…ЖИРОВ, В. Ф. САФОНОВ и П. Г. СКОМОРОХОВ

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ И ИХ ПРОИЗВОДСТВО

ОБОРОНГИЗ • 1940

Г. А. ЖИРОВ, В. Ф. САФОНОВ, П. Г. СКОМОРОХОВ

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ И ИХ ПРОИЗВОДСТВО

Под редакцией Г. А. ЖИРОВА

НКАП СССР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ОБОРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Москва 1940

В книге описаны принципиальные основы и технология производства электролитических конденсаторов, поведение этих конденсаторов в различных условиях работы, электрические характеристики и методика их измерения. Наряду с описанием фактического материала дается объяснение физико-химических явлений, наблюдаемых при производстве и при эксплоатации конденсаторов.

Книга предназначена служить учебным пособием для мастеров, стахановцев и ФЗУ конденсаторного производства и для лиц, работающих в области эксплоатации электролитических конденсаторов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние два-три года в СССР начали сильно развиваться производство и применение электролитических конденсаторов. В связи с этим появилась и необходимость более широкого ознакомления с ними. В то же время, пожалуй, ни один вопрос не отражен так мало в специальной литературе СССР, как вопрос об электролитических конденсаторах: имеется всего два-три десятка статей и переведенная с немецкого книга Гюнтершульце «Электролитические конденсаторы».

В книге Гюнтершульце собран большой и ценный материал, но тем не менее она не может заполнить существующий в нашей литературе пробел. К тому же книга рассчитана на высококвалифицированного специалиста и недоступна массовому читателю.

Перед авторами стояла задача обобщить как отечественный, так и иностранный, особенно американский, опыт производства и эксплоатации электролитических конденсаторов и представить его в популярной форме, доступной не только работнику средней квалификации, но и рядовому рабочему и радиолюбителю. Авторы старались не только описать, но и по возможности объяснить явления, связанные с процессами производства и применения электролитиков. В связи с этим явилась необходимость поместить в книге две вводных главы: «Краткие сведения из электрохимии» и «Электрический конденсатор».

Книга представляет собой коллективный труд работников конденсаторного производства; авторы отдельных глав указаны в оглавлении. Общая редакция выполнена Г. Жировым.

Авторы выражают глубокую благодарность инж. Л. Н. Закгейму и инж. Г. К. Марисову за ценные указания и помощь.

Авторы

Редактор *Е. В. Латынин* Тех. редактор *И. М. Зудакин*

Сдано в набор 14/X 1939 г. Подп. к печати 16/II 1940 г. Индекс А-80-3-2. Тираж 6000. Печ. листов 8½. Формат бумаги 60 × 92 1/16. Уполн. Главлита А.24320. Учетн. авт. л. 9,78. Учетн. № 11. Заказ № 1073.

Типография Оборонгиза. Крещатик 42.

I. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Еще в 50-х годах прошлого столетия была известна способность некоторых металлов при погружении их в электролит покрываться непроводящим слоем и прерывать ток между электролитом и металлом.

Это свойство металл проявляет в том случае, если он является анодом, т. е. если на него подается положительный потенциал.

Элементы, в которых наблюдались подобные явления, назвали детектирующими элементами, а металлы, способные покрываться непроводящим слоем, — вентильными металлами[1].

Если в сосуд, наполненный раствором электролита, поместить легко окисляющийся металл и подать на него положительный потенциал, то можно будет наблюдать образование диэлектрического слоя на поверхности металла вследствие окисления его. Такое свойство ярко выражено, например, у тантала и алюминия.

Первые работы, посвященные теории электролитических конденсаторов, появились в печати в начале текущего столетия. В 1902 г. К. Е. Гютте занялся вопросом о вентильном действии оксидной пленки на алюминии и выдвинул теорию, объясняющую вентильное действие оксидной пленки. Спустя некоторое время, появились крупные теоретические работы Гюнтершульце, который после многочисленных исследований также дал истолкование вентильному действию оксидной пленки. Несколько позднее был сделан ряд изобретений и взяты патенты как на конструктивное оформление электролитических конденсаторов, так и на состав формовочного и рабочего электролитов.

Промышленное производство электролитических конденсаторов, удовлетворявших технике того времени, началось с 1914—1915 гг. В эти годы электролитики изготовлялись из низкосортных материалов и чисто кустарными способами. Вследствие этого электролитические конденсаторы имели весьма плохие электрические характеристики, но уже в то время были широко известны и успешно конкурировали с другими типами конденсаторов.

В процессе дальнейшего развития производства электролитических конденсаторов особое внимание уделяется подбору состава формовочного и рабочего электролитов, исследованию применяемых материалов и установлению режима технологических процессов. В результате многочисленных исследовательских работ и на основе длительного производственного опыта в 1934—1935 гг. были выяснены все основные вопросы, связанные с производством электро-

---

[1] Значения специальных терминов пояснены ниже.

литических конденсаторов. К этому времени было установлено, что чистота применяемых материалов играет решающую роль.

В последнее время большое внимание уделяется механизации производства электролитических конденсаторов. Если до 1930 г. даже в США почти все процессы производства выполнялись вручную, то сейчас они механизированы.

Последние два-три года передовые фирмы, производящие электролитические конденсаторы, стремятся уменьшить габариты конденсаторов, увеличивая активную поверхность анодной фольги. Увеличение удельной емкости достигается главным образом травлением анодной фольги в растворе кислот. Этот метод дает возможность в 3—5 раз уменьшить размеры и вес конденсаторов.

В русской технической литературе в 1902 г. была опубликована первая работа, в которой акад. В. Д. Миткевичем были описаны изготовление и работа электролитического конденсатора.

Анодом в этом конденсаторе служил кусок листового алюминия размерами 250 × 120 × 1 *мм*. По обеим сторонам анода были помещены катоды в виде двух железных пластин того же размера, что и анод. Эта система, скрепленная таким образом, что катоды не соприкасались с анодами, погружалась в сосуд с 7—8%-ным раствором двууглекислого натрия, который служил рабочим электролитом. Формовка производилась при напряжении 100 V постоянным током плотностью 10 mA/*см*², а ток утечки готового конденсатора составлял примерно 1 mA/μF. Емкость такого конденсатора составляла около 100 μF и ее можно было регулировать поднятием электродов из электролита. Несмотря на эти результаты, электролитические конденсаторы акад. Миткевича не получили широкой известности, что объясняется отсталостью техники в дореволюционной России.

В дальнейшем в нашей литературе только после 1930 г. появились работы, посвященные вопросу об электролитических конденсаторах. Первые работы, опубликованные в этот период времени, представляли собой в основном переводы статей, напечатанных по этому вопросу в заграничной литературе, рефераты о них или обзоры, составленные на основании заграничных фирменных данных и каталогов. В 1931—1932 гг. Центральная радиолаборатория (ЦРЛ) провела большую работу по разработке электролитических конденсаторов и изготовила лабораторные образцы низковольтных конденсаторов жидкого типа. При этом в качестве анода применялся алюминий с следующими примесями:

Железо	0,18—0,80%
Кремний	0,17—0,80%
Медь	следы (до 0,006%)
Свинец	следы (до 0,27%)
Цинк	0—0,03%

После предварительного протравливания в 2—3%-ном растворе азотной кислоты в течение 8—15 суток анод формовался в течение 7—10 суток в электролите следующего состава:

Дистиллированная вода	240 *см*³
25%-ный водный раствор аммиака	1 *см*³
Борная кислота	9 *г*

Конденсаторы, разработанные ЦРЛ, не нашли широкого применения и производство их в промышленном масштабе поставлено не было.

В 1932—1933 гг. Лаборатория электрохимии Военной электротехнической академии разработала электролитический конденсатор с жидким электролитом для повышенных рабочих напряжений. В качестве электролита применялся водный раствор борной кислоты и буры.

Испытание этих конденсаторов показало, что емкость их в 3—4 раза меньше, чем емкость заграничных конденсаторов аналогичных размеров, а ток утечки слишком велик и при рабочем напряжении составлял около 1 mA/μF.

Решающий сдвиг в области производства электролитических конденсаторов в СССР произошел в 1934 г., когда ряд лабораторий одновременно начал разрабатывать наиболее нужный для нашей радиопромышленности так называемый сухой тип электролитического конденсатора на рабочее напряжение порядка нескольких сот вольт. Разработка конденсаторов этого типа проводилась одновременно в отделе материаловедения Ленинградского телефонного завода «Красная заря», в изоляционном секторе Ленинградского электрофизического института и в Ростовском государственном университете. В результате работы этих организаций удалось уже в 1935 г. начать промышленное изготовление электролитических конденсаторов на заводе «Электросигнал» в Воронеже и в опытных мастерских Государственного университета в Ростове-на-Дону.

В настоящее время центром промышленного производства электролитических конденсаторов в СССР является завод «Электросигнал».

II. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ЭЛЕКТРОХИМИИ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Опустим в разбавленный раствор серной кислоты две металлические пластинки — медную и цинковую. Если соединить эти две пластинки какой-либо проволокой, например медной, и поднести к проволоке магнитную стрелку, то стрелка отклонится от своего первоначального положения. Следовательно, по проволоке протекает электрический ток.

Подобные системы, составленные из опущенных в раствор пластинок двух различных металлов, которые служат источником тока, называют гальваническими элементами. Пластинки гальванического элемента называют электродами.

Сила, под влиянием которой в цепи элемента течет ток, называется электродвижущей силой гальванического элемента. Ее часто сокращенно обозначают ЭДС. Электродвижущую силу можно получить не только в случае меди и цинка. Во всех случаях при опускании в раствор или даже в обыкновенную воду двух пластинок различных металлов можно получить некоторую ЭДС. Она не зависит от величины пластинок, а зависит только от их материала. ЭДС возникает потому, что любой металл, опущенный в раствор, заря-

жается до некоторого, свойственного только этому металлу потенциала.

Для гальванического элемента, составленного из меди и цинка, ток будет протекать по направлению от меди к цинку. В отношении направления тока вообще условно считают, что электрический ток течет от положительного электрода к отрицательному или от плюса к минусу. В данном случае медная пластинка будет положительным электродом и обозначается знаком плюс (+), а цинковая пластинка будет отрицательным электродом и отмечается знаком минус (—).

Соединив медной проволокой два таких же элемента последовательно, т. е. так, чтобы медная пластинка одного элемента была соединена с цинковой пластинкой другого, заметим, что сила тока, протекающего по проволоке, будет в два раза больше. При увеличении же длины проволоки сила тока уменьшится. Очевидно, проволока затрудняет прохождение электрического тока, оказывая прохождению его некоторое сопротивление.

Таким образом сила тока зависит от электродвижущей силы и от сопротивления цепи. Эта зависимость выражается так называемым законом Ома: сила тока I прямо пропорциональна электродвижущей силе E и обратно пропорциональна сопротивлению R, т. е.

$$I = \frac{E}{R}. \tag{1}$$

Единица силы тока называется **ампером**, единица электродвижущей силы — **вольтом**, а единица сопротивления — **омом**. При этом закон Ома можно написать так: 1 ампер $= \frac{1 \text{ вольт}}{1 \text{ ом}}$, и формулировать следующим образом: **по проводнику протекает ток силой в один ампер, если электродвижущая сила равна одному вольту и сопротивление проводника равно одному ому.**

Сопротивление, как уже было показано, зависит от длины проводника, но оно также зависит и от толщины проводника и рода материала, из которого сделан проводник. Более толстый проводник представляет меньшее сопротивление току, и наоборот. Вообще сопротивление прямо пропорционально длине l и обратно пропорционально толщине q проводника, т. е.

$$R = \rho \frac{l}{q}. \tag{2}$$

В этой формуле длина выражается в сантиметрах, а толщина или поперечное сечение проводника — в квадратных сантиметрах. Сопротивление R проводника длиной в 1 *см* с поперечным сечением в 1 *см*^{2} будет равно:

$$R = \rho \frac{1}{1} = \rho. \tag{2}$$

Величина ρ называется удельным сопротивлением данного проводника и зависит от рода материала, из которого этот проводник сделан. Величина ν, обратная удельному сопротивлению, называется удельной электропроводностью:

$$\nu = \frac{1}{\rho}. \quad (3)$$

Удельная электропроводность, таким образом, характеризует способность данного вещества проводить электрический ток. Величина ее для различных веществ может колебаться в очень широких пределах. Для некоторых веществ она очень мала, и практически можно считать, что данное вещество не проводит электрический ток. Так, например, удельная электропроводность парафина более чем в 1 000 000 000 000 000 000 000 000 (10^{24}) раз меньше удельной электропроводности серебра.

Вещества, хорошо проводящие электрический ток, называют проводниками; вещества же, которые подобно парафину не проводят электрический ток, называют непроводниками или изоляторами.

Хорошими проводниками электрического тока являются металлы и электролиты. Электролитами называют проводящие ток растворы солей, щелочей и кислот в воде и некоторых других растворителях, например в глицерине, гликоле и т. п.

По способу пропускания электрического тока электролиты очень сильно отличаются от металлов. При прохождении тока через металлические проводники с последними не происходит заметных изменений. Наоборот, прохождение тока через электролит всегда сопровождается химическими изменениями вещества раствора, а иногда и электродов.

Прохождение электрического тока по какому-либо проводнику сопровождается выделением тепла. Выделяющееся тепло может очень сильно нагреть проводник, даже раскалить его до белого каления, как это имеет место в осветительных электрических лампочках. Количество тепла, выделяемого током, зависит от величины силы тока, от сопротивления проводника, по которому проходит ток, и от времени, в течение которого ток проходит.

Зависимость между количеством тепла Q, силой тока I, сопротивлением R и временем t выражается законом Джоуля:

$$Q = 0{,}24\, I^2 R t. \quad (4)$$

В этой формуле Q выражено в малых калориях (*кал*), I — в амперах, R — в омах, t — в секундах. Число 0,24 представляет собой количество малых калорий, выделяемых током в один ампер при прохождении через сопротивление в один ом в течение одной секунды.

Для понимания процессов, происходящих в электролитических конденсаторах, необходимо знать механизм прохождения тока через электролитическую ячейку и механизм химических превращений, связанных с этим прохождением. Эти процессы ниже будут рассмотрены более подробно.

2. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКАЯ ДИССОЦИАЦИЯ

Всякое вещество состоит из мельчайших частиц, которые называют молекулами. Молекулы состоят из атомов— еще более мелких частиц. Например борная кислота состоит из молекул борной кислоты. Каждая молекула этого вещества состоит из трех атомов водорода (Н), одного атома бора (В) и трех атомов кислорода (О). Таким образом состав вещества можно выразить формулой: H_3BO_3.

Химические обозначения и названия веществ, наиболее употребительных в конденсаторном производстве, приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ по пор.	Наименование веществ	Химическая формула
1	Алюминий	Al
2	Азотная кислота	HNO_3
3	Борная кислота	H_3BO_3
4	Серная кислота	H_2SO_4
5	Лимонная кислота	$C_3H_4(OH)(CO_2H)_3$
6	Соляная кислота	HCl
7	Аммиак (газообразный)	NH_3
8	Гидроокись аммония (водный аммиак)	$NH_4(OH)$
9	Гидроокись натрия (едкий натр)	NaOH
10	Гидроокись калия (едкий калий)	KOH
11	Тетраборат аммония	$(NH_4)_2B_4O_7$
12	Тетраборат натрия (бура)	$Na_2B_4O_7$
13	Пентаборат аммония	$(NH_4)_2B_{10}O_{16}$
14	Углекислый аммоний	$(NH_4)_2CO_3$
15	Углекислый натрий (сода)	Na_2CO_3
16	Хлорная медь	$CuCl_2$
17	Глицерин	$C_3H_5(OH)_3$
18	Этиленгликоль	$C_2H_4(OH)_2$
19	Этиловый спирт	C_2H_5OH
20	Сахар	$C_{12}H_{22}O_{11}$
21	Маннит	$C_6H_8(OH)_6$

При растворении одного вещества в другом (например борной кислоты в воде) молекулы растворяемого вещества распределяются между молекулами растворяющего вещества.

Но не всякое растворенное вещество будет проводить заметно электрический ток. Например сахар или спирт, будучи растворены в дестиллированной воде, тока не проводят.

Чем же объяснить, что одни вещества, будучи растворены в воде, проводят электрический ток, а другие его не проводят? На этот вопрос современная наука отвечает так. Молекулы веществ, которые в растворе проводят электрический ток, распадаются на частицы, которые электрически заряжены. Эти электрически заряженные части молекулы называются ионами. Молекулы серной кислоты в воде

распадаются на ионы водорода и так называемый кислотный остаток по уравнению:

$$H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{--}.$$

Знаки «+» и «—» обозначают, что ионы заряжены или положительным или отрицательным электричеством, а количество знаков указывает на число единиц заряда, которые несет ион. Ионы, заряженные положительно, называют катионами, а ионы, заряженные отрицательно, называют анионами.

Распадение молекул растворенного вещества на ионы называется электролитической диссоциацией.

У некоторых веществ при их растворении все молекулы распадаются на ионы, даже при больших концентрациях; у других не все, а только некоторая часть распадается на ионы, а полностью распадаются эти вещества только при очень маленьких концентрациях. Отношение числа распавшихся молекул ко всему числу молекул, находящихся в растворе, называется степенью диссоциации. По степени диссоциации вещества можно разделить на два рода. Кислоты, как, например, соляная, серная, азотная, гидраты окиси калия, натрия и большинство солей, очень сильно диссоциированы и они называются сильными электролитами. Вещества же, степень диссоциации которых мала, например борная кислота, называют слабыми электролитами.

Кроме того, в зависимости от концентрации раствора, особенно у слабых электролитов, сама молекула может распасться не полностью. Борная кислота, например, может диссоциировать следующим образом:

$$H_3BO_3 \rightarrow 3H^+ + BO_3^{---}$$
$$H_3BO_3 \rightarrow 2H^+ + HBO_3^{--}$$
$$H_3BO_3 \rightarrow H^+ + H_2BO_3^-$$

3. ЭЛЕКТРОЛИЗ

Посмотрим теперь, что будет происходить в ванночке, наполненной раствором борной кислоты, если пропускать через нее постоянный ток.

В качестве электродов возьмем платиновые пластинки и соединим их с источником тока, как показано на фиг. 1. Электрод, присоединенный к положительному полюсу источника тока, называется анодом, а электрод, присоединенный к отрицательному полюсу,— катодом.

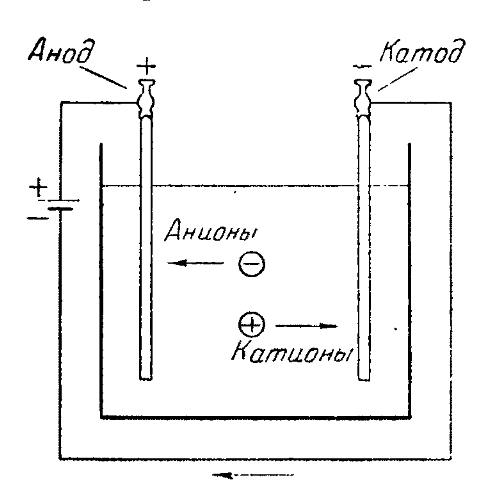
Как только замкнем эту цепь, анионы BO_3^{---} в силу электрического притяжения будут притягиваться к аноду, а катионы H^+— к катоду. Подойдя к катоду, катионы H^+ разрядятся, соединятся в молекулы H_2 и в виде пузырьков газа (водорода) выделятся из раствора. Анионы BO_3^{---} также разрядятся на аноде, но так как кислотный остаток самостоятельно существовать не может, то он сейчас же соединится с молекулами воды по уравнению:

$$3H_2O + 2BO_3 = 2H_3BO_3 + 3O,$$

и из раствора в виде пузырьков газа будет выделяться освободившийся кислород.

Так как убывающие (в силу нейтрализации с зарядами ионов) заряды на электродах все время пополняются от источника тока, то ионы будут непрерывно притягиваться к электродам, где они будут разряжаться, вступать в дальнейшие химические реакции или выделяться наружу, как уже было показано, и этот процесс, так называемый электролиз, будет продолжаться до тех пор, пока замкнута электрическая цепь и проходит ток.

Электролиз не всегда будет происходить так, как показано на примере раствора борной кислоты с платиновыми электродами.



Фиг. 1. Электролитическая ванночка.

Если вместо борной кислоты взять раствор медного купороса ($CuSO_4$), а вместо платиновых электродов медные, тогда к аноду пойдут анионы SO_4^{--}, а к катоду — ионы меди Cu^{++}.

Разрядившиеся катионы Cu^{++} выделятся на медном катоде, а анионы SO_4^{--}, после того как разрядятся, соединятся с медью анода и образуют опять медный купорос, который растворится в воде и опять даст ионы Cu^{++} и SO_4^{--}. Так будет продолжаться до тех пор, пока весь анод не растворится и не будет перенесен ионами Cu^{++} на катод.

Одним из применений этого процесса в технике является покрытие одного металла другим с целью образования предохраняющей пленки.

Совсем иначе будет происходить процесс, если в качестве анода использовать алюминий, а электролитом взять раствор соляной кислоты HCl. Тогда на катоде также будет выделяться водород, а на аноде — хлор (Cl), который будет соединяться с алюминием, образуя хлорный алюминий ($AlCl_3$). В этом случае анод будет растворяться в растворе без переноса на катод. Поэтому присутствие хлора опасно в электролитическом конденсаторе: ионы хлора будут разъедать алюминиевый анод и испортят конденсатор.

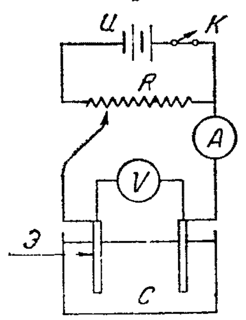
4. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Теория электролитической диссоциации удовлетворительно объясняет механизм прохождения тока через электролит: электрический ток через электролит переносится частицами растворенного вещества — ионами.

Чем больше количество ионов в растворе, т. е. чем больше их концентрация, а также чем больше скорость их передвижения, тем большее количество электричества они перенесут в одно и то же

время, иначе говоря, тем больше будет электропроводность этого электролита.

Электропроводность электролитов, применяемых в электролитических конденсаторах, оказывает очень существенное влияние как на процесс их изготовления, так и на их электрические характеристики. Поэтому при выборе подходящих электролитов всегда обращают внимание на их удельную электропроводность.



Фиг. 2. Схема измерения электропроводности электролита на постоянном токе.

Если не требуется большой точности, то электропроводность электролита можно измерить по так называемому способу вольтметра-амперметра. Схема такой измерительной установки показана на фиг. 2. Здесь *U* — источник тока; *C* — сосуд, в который наливается измеряемый электролит и куда затем опускают металлические (часто платиновые) электроды *Э*; *A* — амперметр для измерения силы тока, протекающего через электролит; *V* — вольтметр, показывающий напряжение на электродах; *R* — реостат, при помощи которого устанавливается на электродах желаемое напряжение; *K* — ключ для замыкания и размыкания цепи.

Электроды должны быть установлены точно друг против друга. Площадь электродов и расстояние между ними должны быть точно измерены. Предполагается, что оба электрода одинакового размера. Замкнув ключ *K*, устанавливают при помощи реостата *R* по вольтметру желаемое напряжение *E*, а по амперметру отсчитывают силу тока *I*, проходящего по цепи; тогда по закону Ома можно подсчитать сопротивление *R* электролита между электродами. Так как расстояние *l* между электродами и площадь *q* электродов известны, то по формулам (2) и (3) легко вычислить электропроводность электролита:

$$\nu = \frac{l}{Rq}. \qquad (5)$$

Фиг. 3. Схема измерительного моста.

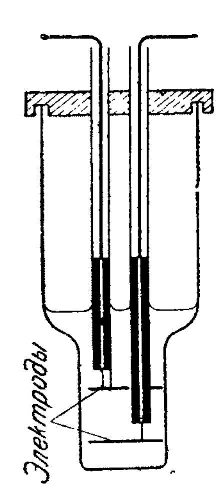
Но этот метод недостаточно точен. Поэтому обычно электропроводность электролитов измеряют более точным методом при помощи измерительног моста переменного тока. Схема этого моста Кольрауша изображена на фиг. 3. Буквами R_1, R_2 и R_3 обозначены сопротивления плеч моста, а R_x — сопротивление сосуда с электролитом. В точках AA' к мосту подводится переменный ток, а в точках BB_1 приключается телефон *T*. Когда через телефон проходит переменный ток, в нем слышится звук; если же ток отсутствует — звука не слышно.

По правилу разветвления токов (правило Кирхгофа) через телефон не будет протекать ток в том случае, когда имеется следую-

щее равенство отношений плеч моста:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3}. \qquad (6)$$

Изменяя соотношение сопротивлений плеч моста, можно добиться такого положения, когда в телефоне не будет слышно звука, или, во всяком случае, сила звука будет наименьшей. В этом случае, пользуясь равенством (6), можно вычислить сопротивление электролита:



Фиг. 4. Сосуд для измерения электропроводности электролитов.

$$R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2},$$

а из последнего определить удельную электропроводность:

$$\nu = \frac{C}{R_x}. \qquad (7)$$

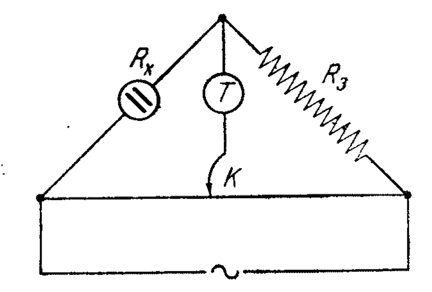
В этой формуле C есть так называемая электролитическая емкость сосуда. Величина C зависит от размера электродов, от расстояния и положения их один относительно другого, от формы сосуда и от некоторых других причин. Если электроды укреплены неподвижно один относительно другого, то для данного сосуда C является величиной постоянной. На фиг. 4 показан такой сосуд для измерения электропроводности электролитов.

Электролитическую емкость сосуда определяют заранее, измеряя сопротивление электролита с известной электропроводностью. Часто для этого употребляют раствор хлористого калия, электропроводность которого хорошо изучена.

Пусть ν_1 — удельная электропроводность хлористого калия, а измеренное сопротивление раствора хлористого калия — R_x, тогда по формуле (7) можно вычислить электролитическую емкость сосуда:

$$C = \nu_1 R_x.$$

Наполняя затем сосуд любым другим электролитом, электропроводность которого желательно измерить, определяют R_x, а по формуле (7) вычисляют удельную электропроводность. На фиг. 5 показана схема моста Кольрауша в том виде, в каком он наиболее распространен.



Фиг. 5. Схема моста Кольрауша.

Здесь вместо магазинов сопротивлений (см. фиг. 3) R_1 и R_2 на линейку с делениями натянута проволока из константана. Передвижением по проволоке ползунка K устанавливается отношение

двух плеч при равновесии схемы:

$$\frac{R_1}{R_2}.$$

На линейке нанесены деления, выражающие это отношение. Такая конструкция моста значительно упрощает измерения и расчеты. Установив минимум звука в телефоне, цифру на линейке, над которой оказался ползунок, умножают на R_3 и получают сопротивление электролита.

5. pH РАСТВОРА

Выше было установлено, что многие вещества в растворе распадаются на ионы. Кислоты распадаются на ионы водорода и так называемый кислотный остаток. Так соляная и азотная кислоты распадаются по уравнениям:

$$HCl \rightarrow H^+ + Cl^-;$$

$$HNO_3 \rightarrow H^+ + NO_3^-.$$

Щелочи распадаются на ион гидроксила (OH^-) и ион щелочного металла. Например едкий натр распадается по уравнению:

$$NaOH \rightarrow Na^+ + OH^-.$$

Нашатырный спирт (гидроокись аммония) распадается так:

$$NH_4OH \rightarrow NH_4^+ + OH^- \quad \text{и т. д.}$$

Таким образом, кислота в растворе всегда характеризуется наличием ионов H^+, а щелочь — наличием ионов OH^-. В зависимости того, какие из этих ионов преобладают в растворе, последний будет или кислым или щелочным. Количество же или концентрация тех или иных ионов будет определять степень (силу или крепость) кислотности или щелочности раствора. Следовательно, чтобы определить силу щелочности или кислотности раствора, необходимо определить концентрацию ионов H^+ или OH^-.

На практике обычно определяют не концентрацию этих ионов, а логарифм концентрации H^+ ионов, взятый с обратным знаком. Величина эта носит название водородного показателя и обозначается через pH.

Для чистой дестиллированной воды pH = 7. Это нейтральная точка, так как молекулы воды распадаются на равное количество ионов водорода и гидроксила:

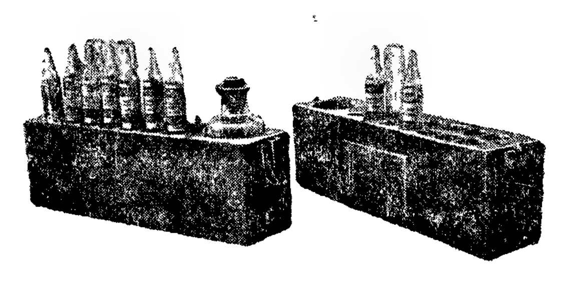
$$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-.$$

Из этого следует, что если к кислоте приливать щелочь (или к щелочи кислоту), то также можно получить нейтральную точку, когда ионы H^+ и OH^- количественно сравняются.

Нужно заметить, что чем меньше pH, тем больше кислотность раствора. Самая сильная кислотность будет тогда, когда pH = 0,

а самая сильная щелочность, когда pH = 14. Значения pH между нулем и семью будет характеризовать кислотность, а значения pH между 7 и 14 будут характеризовать щелочность раствора.

Существует несколько методов определения pH раствора. Из них наиболее распространен в промышленности так называемый колориметрический метод. Суть этого метода заключается в следующем: готовят целый ряд растворов с заранее известным pH. Обычно эти растворы составляют таким образом, чтобы значения их pH отличались друг от друга на 0,2 единицы. Наполняют этими растворами стеклянные пробирки (фиг. 6) и в каждую из них приливают определенное количество (несколько капель) индикатора. В зависимости от pH раствора индикатор окрасит его в определенный цвет, свойственный только этому pH. Эти растворы служат для сравнения.

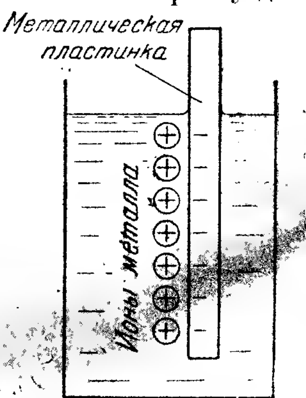


Фиг. 6. Компаратор для колориметрического определения pH.

Если теперь нужно определить pH неизвестного раствора, то поступают следующим образом. Наполняют неизвестным раствором пробирку и прибавляют к нему тот же самый индикатор и в таком же количестве, как и в растворах для сравнения. Окраску данного раствора сравнивают с окраской ранее приготовленных растворов с уже известным pH. Растворы, одинаковые по окраске, очевидно, имеют одинаковое pH. Во избежание ошибок необходимо подбирать стеклянные пробирки одинакового диаметра.

6. ПОЛЯРИЗАЦИЯ И ПАССИВНОСТЬ

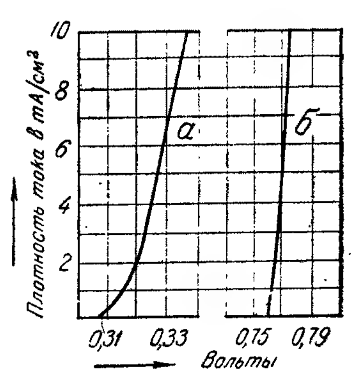
Рассматривая процессы, происходящие при электролизе, мы до сих пор не интересовались изменениями, которые происходят с отдельными электрическими потенциалами электродов. Так как нас в дальнейшем будут интересовать только процессы, проходящие на аноде, то установим, при каких условиях будет происходить растворение анода при электролизе.



Фиг. 7. Электрические заряды на металлической пластинке, опущенной в раствор.

В самом начале уже было сказано, что металл, опущенный в раствор, может зарядиться до определенного электрического потенциала. Этот потенциал возникает в результате того, что металл, опущенный в раствор, может отщепить от себя и отдать в раствор

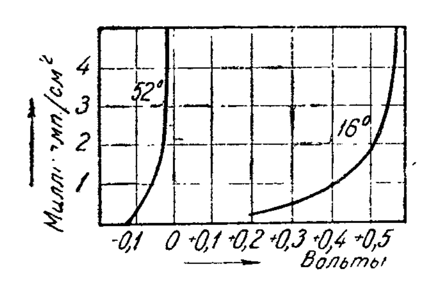
ионы. Так как ионы металла заряжены положительно, то металлическая пластинка зарядится отрицательно (фиг. 7). Возникшие отрицательные заряды на пластинке не пустят далеко положительные ионы металла; в растворе наступит некоторое равновесие, которое и будет определять собой электрический потенциал металлической пластинки. Это равновесие, а следовательно и величина потенциала, зависят от материала металлической пластинки и концентрации раствора. Такой потенциал называют о б р а т и м ы м п о т е н ц и а л о м электрода.



Фиг. 8. Изменение потенциала медного (*а*), ртутного (*б*) анодов с плотностью тока.

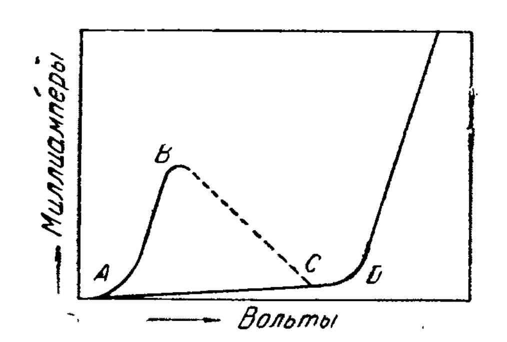
Если теперь сделать электрод анодом, то для того, что бы нарушить установившееся равновесие, т. е., чтобы заставить металл растворяться и дальше, необходимо приложить к электроду положительный потенциал несколько больший обратимого потенциала данного металла. Таким образом растворение металла анода при электролизе может начаться только при напряжении на аноде, несколько превышающем обратимый потенциал металла, из которого сделан анод. Так, например, растворение медного анода в растворе одного граммоля сульфата меди ($CuSO_4$) начнется при напряжении на аноде, несколько превышающем 0,32 V. Однако это будет только при низких плотностях тока.

Если же будем увеличивать плотность тока и измерять потенциал анода, то заметим, что для некоторых металлов потенциал на аноде возрастает. На фиг. 8 и 9 показано изменение анодных потенциалов меди, ртути и никеля при электролизе их в соответствующих растворах. При низких плотностях тока растворение меди начинается при потенциале анода чуть большем 0,32 V, ртути — чуть большем 0,75 V и никеля большем 0,2 V. С ростом плотности тока, однако, анодный потенциал этих металлов возрастает. Особенно сильно возрастает он для случая с никелевым анодом. Наблюдается появление некоторой добавочной электродвижущей силы, направленной противоположно. Такое явление называется п о л я р и з а ц и е й. При быстром перемешивании раствора или при повышении температуры поляризация обычно уменьшается.



Фиг. 9. Изменение потенциала никелевого анода с плотностью тока.

Во всех этих случаях, хотя аноды и поляризуются, растворение металла анода, однако, происходит нормально, т. е. в соответствии с количеством прошедшего тока. Однако, если для никелевого анода увеличивать плотность тока и дальше, то в определенный момент анодный потенциал резко возрастает, а плотность тока падает. В то же время анод перестает растворяться. Это явление называется **пассивностью** металла. На фиг. 10 показана в общем виде зависимость анодного потенциала от плотности тока для металла пассивирующегося (становящегося пассивным). В точке *B* анод становится пассивным, потенциал возрастает, а плотность тока падает до значения, представленного точкой *C*. При дальнейшем увеличении плотности тока анодный потенциал быстро возрастает до тех пор, пока не начнется новый процесс — выделение кислорода (точка *D*). Дальнейшее увеличение плотности тока вызывает возрастание потенциала только в результате поляризации. Если же теперь начать уменьшать плотность тока, то активное состояние анода (т. е. состояние, в котором он легко растворяется) не возвращается в точке *C*, а при значительно более низком потенциале, именно в точке *A*.



Фиг. 10. Зависимость анодного потенциала от плотности тока у пассивирующегося металла.

Пассивное состояние металла зависит не только от материала анода, но и от раствора. Так, например, алюминий очень легко пассивируется во многих кислотах, содержащих кислород, как серная, борная, щавелевая, уксусная и т. п., и их солях, в то же время он почти совсем не пассивируется в крепких щелочах и в галоидоводородных кислотах (HCl, HBr, HJ). В подходящих растворах явление пассивности может наблюдаться у очень многих металлов.

Пассивность металлов можно наблюдать не только при электролизе. Если железо погрузить в концентрированную азотную кислоту, то оно сначала растворяется, а потом через небольшой промежуток времени растворение его прекращается.

Нагреванием на воздухе многие металлы, например железо, никель, кобальт и др., также можно сделать пассивными. Особенно чувствителен в этом отношении алюминий; простого соприкосновения с воздухом достаточно, чтобы он сделался пассивным. Таким образом пассивность — это своеобразная способность металла сопротивляться разрушению.

Так как при явлениях пассивности очень часто на поверхности анода, даже при очень детальном исследовании, нельзя было обнаружить никаких изменений, то явление это в разное время объясняли различно. В настоящее время считают, что явление пассивности

есть результат появления на поверхности металла очень тонкой пленки, состоящей из окиси металла или его соли.

Механизм покрытия поверхности металлического анода пленкой можно представить себе следующим образом. При электролизе ионы металла соединяются с анионами раствора или с кислородом, обычно появляющимся в результате химической реакции в прианодном слое раствора. Если продукты этого соединения плохо растворимы или нерастворимы совсем, то они могут осаждаться на поверхности анода, образуя тонкий покровный слой. Этот слой и предохраняет металл от дальнейшего растворения. Обычно этот слой является плохим проводником электрического тока. Поэтому сопротивление электрической ячейки постепенно возрастает и на прианодном слое падение напряжения увеличивается; одновременно падает сила тока. Но образующаяся, таким образом, покровная пленка является не сплошной. Она вся пронизана очень тонкими порами, которые позволяют ионам раствора проходить к непокрытому металлу и постепенно наращивать пленку в толщину.

В зависимости от рода металла и раствора, применяемых при электролизе, покровная пленка может получаться рыхлой или плотной; она может плотным, почти сплошным слоем прилегать к аноду или, наоборот, по мере наращивания отслаиваться. Сильно пористая пленка не прекращает анодного растворения металла; хотя при утолщении сопротивление ее и растет, однако защитные свойства такой пленки незначительны. Вообще можно сказать, что чем тоньше образующаяся на металле пленка, тем лучше ее защитные свойства, так как она и не утолщается потому, что хорошо защищает металл от растворения. Защитная пленка, например, на алюминии имеет толщину порядка 10^{-3}—10^{-6} *см*. Она очень тонким и плотным слоем прилегает к алюминию, предохраняя его от дальнейшего растворения.

Способность металлов пассивироваться, т. е. сопротивляться дальнейшему растворению путем образования на своей поверхности покровной защитной пленки, очень широко используется в технике для предохранения металлов от разрушения.

Получающаяся при анодном окислении алюминия пленка состоит из окислов алюминия и благодаря своим хорошим электроизоляционным свойствам и так называемому вентильному (клапанному) эффекту получила широкое применение в электротехнической промышленности. Если к ячейке с алюминиевым анодом (например в растворе борной кислоты или буры), на котором уже образована пленка из окислов алюминия, приложить напряжение, то даже при напряжении в несколько сот вольт незаметно значительного прохождения тока. Наоборот, если алюминиевый электрод сделать катодом, т. е. приключить его к отрицательному полюсу, то через него потечет ток почти такой же величины, как если бы алюминий не был пассивен. Таким образом оксидная пленка на алюминии обладает свойством в одном направлении (катодном) пропускать ток, а в другом направлении (анодном) его не пропускать. Это свойство пленки носит название вентильного эффекта

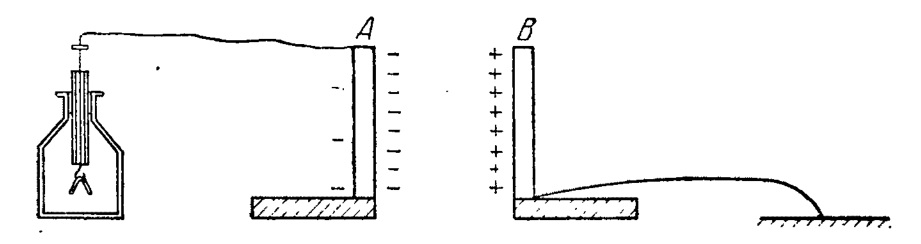
и используется в электротехнике для создания электролитических выпрямителей переменного тока.

Пленка, будучи очень тонкой, все же может легко выдерживать напряжения до 600 V. Она, кроме того, обладает и достаточно высокой диэлектрической постоянной. По определениям Гюнтершульце диэлектрическая постоянная оксидной пленки на алюминии равна приблизительно 7,45. Эти свойства пленки нашли широкое применение в изготовлении электролитических конденсаторов, свойствам и производству которых посвящена эта книга.

III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР

1. ОБЩИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Соединим, как показано на фиг. 11, металлическую пластинку *А*, укрепленную на изолирующей подставке, с электроскопом и начнем



Фиг. 11. Принцип действия конденсатора.

заряжать пластинку отрицательным электричеством. Степень (величина угла) расхождения листочков электроскопа покажет нам, до какого потенциала заряжена пластинка. Зарядив пластинку *А*, заметим расхождение листочков электроскопа. Теперь возьмем такую же изолированную пластинку *В* и соединим ее проводником с землей. Если мы будем приближать *В* к *А*, то заметим, что по мере сближения пластинок листочки электроскопа начинают спадать, показывая тем самым, что потенциал в *А* уменьшается благодаря присутствию *В*, хотя количество электричества в *А* и остается неизменным. Чтобы достигнуть прежнего расхождения листочков электроскопа, иначе говоря, чтобы зарядить пластинку *А* до первоначального потенциала, потребуется передать ей добавочное количество электричества.

Таким образом благодаря присутствию пластинки *В*, соединенной с землей, пластинка *А* при том же потенциале может удерживать большее количество электричества. Способность тела удерживать в себе электричество называется его э л е к т р и ч е с к о й е м к о с т ь ю. Увеличение емкости пластинки *А* можно объяснить следующим образом: как только к заряженной пластинке *А* была поднесена пластинка *В*, последняя, благодаря индукции, зарядилась электричеством, противоположным по знаку электричеству на пластинке *А*; электричество, однозначное с тем, которое имелось на пластинке *А*,

уходило по проводнику в землю. Благодаря притяжению между разноименными зарядами часть электричества в A была притянута к стороне пластинки, обращенной в сторону B; эта часть электричества оказалась как бы связанной с пластинкой B, уйдя с листочков электроскопа, так что требовалось передать пластинке A гораздо больший заряд, чтобы вновь раздвинуть на такой же угол листочки электроскопа. Таким образом благодаря присутствию второй металлической пластинки, соединенной с землей, удается во много раз увеличить электрическую емкость первой пластинки; получается сгущение или, как принято называть, конденсация электричества.

Аналогичное явление наблюдается, если мы две таких пластинки, разделенных изолятором (непроводником), присоединим к полюсам какого-либо источника постоянного тока, например к аккумулятору. Тогда одна пластинка зарядится положительными, а другая — отрицательными электрическими зарядами, притяжение между которыми опять-таки позволяет сгущать (конденсировать) электрическую энергию.

Приспособления, состоящие из двух проводников (металлических пластинок), разъединенных изолятором, в которых происходит сгущение электрических зарядов, называются электрическими конденсаторами. Металлические пластинки называются обкладками конденсатора, среда между ними — диэлектриком.

2. ЕМКОСТЬ КОНДЕНСАТОРА

Расхождение листочков электроскопа показывает нам величину электрического потенциала, до которого заряжается пластинка A. Чем больше мы перенесем электрических зарядов, тем сильнее разойдутся листочки электроскопа. Измерения показывают, что количество электричества, перенесенное на пластинку, прямо пропорционально потенциалу, до которого зарядилась пластинка, т. е.

$$Q = C \cdot U, \tag{8}$$

где Q — количество электричества, U — потенциал, C — коэфициент пропорциональности. Смысл коэфициента пропорциональности C мы можем выяснить, переписав выражение (8) следующим образом:

$$C = \frac{Q}{U}. \tag{8'}$$

Нетрудно видеть, что C по величине равно такому количеству электричества, которое требуется перенести на пластинку, чтобы ее потенциал стал равен единице. Это и будет называться емкостью конденсатора.

Будем теперь удалять и приближать пластинку B к заряженной пластинке A и следить за поведением листочков электроскопа. Мы заметим, что при сближении пластин листочки электроскопа

спадают, а при удалении расходятся. Это показывает, что в первом случае потенциал уменьшается, а во втором случае увеличивается. Но так как количество электричества все время одно и то же, то колебание потенциала, очевидно, можно объяснить тем, что в первом случае требуется электрических зарядов больше, а во втором случае меньше. Иначе говоря, при сближении пластин емкость конденсатора увеличивается, а при удалении — уменьшается. Следовательно, емкость конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между пластинами или обкладками конденсатора.

Для нашего конденсатора в качестве изолирующего материала между обкладками (диэлектрика) мы брали воздух. Однако в качестве изолятора можно применять и другие вещества, например стекло, слюду, каучук, парафин и др.

Емкость конденсатора зависит и от материала изолятора или диэлектрика. Если, например, между пластинками поместить в качестве изолятора слюду, то емкость конденсатора будет в 7 раз больше, чем в том случае, когда изолятором служил слой воздуха. Применение же в качестве диэлектрика парафинированной бумаги вместо воздуха дает увеличение емкости в 2,5 раза.

Таблица 2

Материал	Величина диэлектрической постоянной
Воздух	1,00059
Эбонит	От 2 до 5
Парафин	Около 2,5
Слюда	От 6 до 8
Стекло обыкновенное	От 4 до 6
Стекло оптическое	До 10
Оксидная пленка алюминия	7,45

Число, выражающее отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости конденсатора, диэлектриком которого является безвоздушное пространство, называется диэлектрической постоянной данного изолятора. Как видно из табл. 2, величина диэлектрической постоянной для различных изоляторов весьма различна.

Емкость конденсатора выражается следующей зависимостью:

$$C = \frac{\varepsilon q}{4\pi d}, \quad (9)$$

которая формулируется так: емкость конденсатора C прямо пропорциональна диэлектрической постоянной диэлектрика ε, разделяющего обкладки, площади одной из обкладок q, и обратно пропорциональна расстоянию между обкладками d. Если q выражено в квадратных сантиметрах, d — в сантиметрах, то емкость C также выразится в сантиметрах.

Эту формулу можно получить следующим путем. Пусть U — разность потенциалов между обкладками конденсатора; q — площадь каждой обкладки; ε — диэлектрическая постоянная изолятора, помещенного между обкладками; d — расстояние между ними (толщина диэлектрика); σ — плотность электрических зарядов на

обкладках. Из физики известно, что электрическое поле между двумя заряженными плоскостями можно считать однородным.

Напряженность этого поля E выражается формулой:

$$E = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon}. \qquad (10)$$

Напряженность поля есть не что иное, как напряжение, падающее на единицу длины (1 *см*), т. е.

$$E = \frac{U}{d}. \qquad (11)$$

Из формул (10) и (11) мы можем получить еще другое выражение для U:

$$U = \frac{4\pi\sigma d}{\varepsilon}. \qquad (12)$$

Количество же электричества Q, заключенного в конденсаторе, равно произведению электрической плотности на поверхность обкладки:

$$Q = \sigma q. \qquad (13)$$

Ранее была определена емкость конденсатора как отношение заряда к потенциалу или к напряжению между обкладками конденсатора:

$$C = \frac{Q}{U}. \qquad (8')$$

Подставив сюда значения Q и U из формул (12) и (13), получим выражение для емкости:

$$C = \frac{\varepsilon q}{4\pi d}. \qquad (9)$$

3. ЕДИНИЦЫ ЕМКОСТИ

В технике величина электроемкости выражается в фарадах. Емкостью в одну фараду обладает конденсатор, в котором накапливается один кулон электричества при разности потенциалов между его обкладками в один вольт:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ вольт}} = 1 \text{ фарада}.$$

Для практического применения единица емкости — фарада — оказалась весьма неудобной — слишком большой. В электротехнике принято пользоваться единицей емкости, равной одной миллионной части фарады; она называется микрофарадой. В радиоприемниках в большом количестве применяются такие конденсаторы, емкость которых в тысячи раз меньше микрофарады. Малые значения емкости обычно выражаются в микромикрофарадах или в сантиметрах. Приняты следующие обозначения единиц емкости:

Фарада — Ф или F.

Микрофарада — *мкф* или μF.

Микромикрофарада — *мкмкф* или μμF.

Сантиметр — *см* или cm.

Соотношение между отдельными единицами емкости дается ниже:

$$1F = 1 \cdot 10^6 \mu F = 1 \cdot 10^{12} \mu\mu F = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}$$
$$1\mu F = 1 \cdot 10^6 \mu\mu F = 9 \cdot 10^5 \text{ см}$$
$$1\mu\mu F = 0{,}9 \text{ см}$$

$$1 \text{ см} = 1{,}11 \mu\mu F = 1 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \mu F = 1{,}11 \cdot 10^{-12} F$$
$$1\mu\mu = 1 \cdot 10^{-6} \mu F = 1 \cdot 10^{-12} F$$
$$1\mu F = 1 \cdot 10^{-6} F$$

Показатель степени означает, что к единице надо прибавить столько нулей, сколько единиц в показателе степени:

$$1 \cdot 10^6 = 1\,000\,000; \quad 9 \cdot 10^5 = 900\,000.$$

Если показатель степени отрицателен, то это означает, что единицу надо разделить на единицу с числом нулей, равным показателю степени:

$$1 \cdot 10^{-6} = \frac{1}{1\,000\,000}.$$

4. УДЕЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ

Относительное сравнение различных конденсаторов обычно производится по величине их удельной емкости. В практике различают двоякого рода удельную емкость: поверхностную и объемную.

Поверхностной удельной емкостью называется емкость, отнесенная к 1 *см*^{2} поверхности одной обкладки конденсатора. Если емкость конденсатора выражена в микрофарадах, то его поверхностная удельная емкость равна:

$$\frac{\text{емкость конденсатора в микрофарадах}}{\text{площадь обкладки конденсатора в см}^2} = \frac{\mu F}{\text{см}^2}.$$

Объемная же удельная емкость конденсатора определяется отношением:

$$\frac{\text{емкость конденсатора в } \mu F}{\text{общий объем конденсатора в см}^3} = \frac{\mu F}{\text{см}^3}.$$

Из всех известных нам электрических конденсаторов, применяемых в технике, наибольшей удельной емкостью (поверхностной и объемной) обладают электролитические конденсаторы. Последние, по этой именно причине, нашли широкое применение в технике.

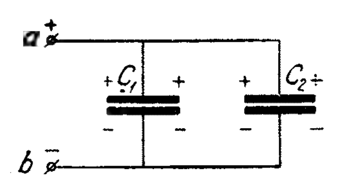
5. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Чем больше поверхность обкладки, тем больше емкость конденсатора. Но не всегда удобно получать конденсаторы с большой емкостью путем увеличения поверхности их обкладок. Поэтому, чтобы получить большую емкость, часто соединяют несколько малых конденсаторов параллельно. На фиг. 12 показана схема такого соеди-

нения, как бы увеличивающего общую поверхность пластин. Поэтому общая емкость параллельно включенных конденсаторов равна сумме их емкостей:

$$C_{общ} = C_1 + C_2 + \dots C_n. \qquad (14)$$

При параллельном соединении все конденсаторы находятся под одним и тем же напряжением.



Фиг. 12. Схема параллельно включенных конденсаторов.

Можно соединять конденсаторы и последовательно, как показано на фиг. 13. Если емкости отдельных конденсаторов равны C_1, C_2,...C_n, то общая емкость $C_{общ}$ всей этой батареи конденсаторов вычисляется следующим образом. При соединении обкладки b последнего конденсатора с землей потенциал ее станет, равен нулю. Теперь подведем к обкладке a первого конденсатора количество электричества $+Q$. Этот заряд на другой обкладке этого же конденсатора свяжет электрический заряд $-Q$ и заставит перейти на обкладку второго конденсатора электрический заряд $+Q$ и т. д. Потенциалы соединенных друг с другом обкладок соседних конденсаторов по отношению к земле в точке b одинаковы, но между обеими обкладками одного и того же конденсатора имеется разность потенциалов (напряжение). Пусть напряжение между обкладками отдельных конденсаторов будет U_1, U_2,... U_n, тогда напряжение U между обкладками a и b будет равно сумме этих напряжений:

Фиг. 13. Схема последовательно включенных конденсаторов.

$$U = U_1 + U_2 + \dots U_n. \qquad (15)$$

Но из формулы (8) следует, что напряжение каждого конденсатора зависит от его емкости, т. е.

$$U = \frac{Q}{C}; \quad U_1 = \frac{Q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}; \quad U_n = \frac{Q}{C_n}.$$

Подставив эти значения в формулу (15), получим:

$$\frac{Q}{C_{общ}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \dots \frac{Q}{C_n};$$

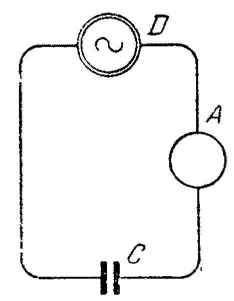
деля правую и левую части на Q, получим:

$$\frac{1}{C_{общ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \frac{1}{C_n}, \qquad (16)$$

т. е. обратная величина общей емкости батареи из нескольких конденсаторов, соединенных последовательно, равна сумме обратных величин емкостей отдельных конденсаторов.

6. КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Прохождение тока через конденсатор. При включении конденсатора в цепь постоянного тока по соединительным проводникам его пройдет только мгновенный зарядный ток, который прекратится, как только конденсатор зарядится и напряжение на его обкладках сравняется с напряжением источника постоянного тока. Заряженный конденсатор не пропускает через себя постоянный ток, так как изолятор (диэлектрик) обладает очень большим электрическим сопротивлением.

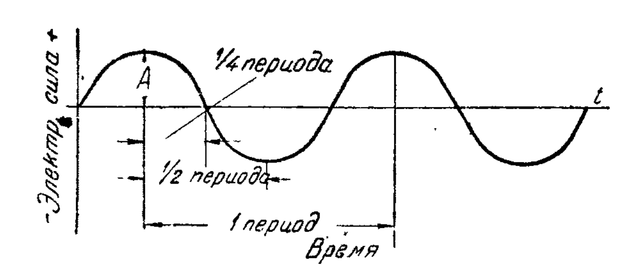


Фиг. 14. Конденсатор в цепи с динамомашиной.

Присоединим теперь конденсатор к цепи переменного тока, как показано на фиг. 14, где D — генератор переменного тока, A — амперметр переменного тока и C — конденсатор.

Амперметр A покажет наличие тока, проходящего через конденсатор. Следовательно, переменный ток совершенно свободно проходит через конденсатор с диэлектриком любого качества.

Напряжение и сила переменного тока в общем случае характеризуются кривой-синусоидой, представленной на фиг. 15. Видно, что со временем переменная электрическая величина (напряжение или сила тока) сначала возрастает и за время $\frac{T}{4}$ достигает макси-



Фиг. 15. Синусоида.

мального положительного значения A, затем начинает уменьшаться и к моменту $\frac{T}{2}$ становится равной нулю, после чего принимает отрицательное значение, которое ко времени $\frac{3T}{4}$ доходит до величины $-A$, равной $+A$, но обратной по знаку, и далее, уменьшаясь, к моменту времени T доходит до нуля. С этого момента цикл начинает повторяться вновь. Величина A называется амплитудой. а время T, за которое электрическая величина, пройдя полный цикл, пришла опять в первоначальное состояние, называется периодом.

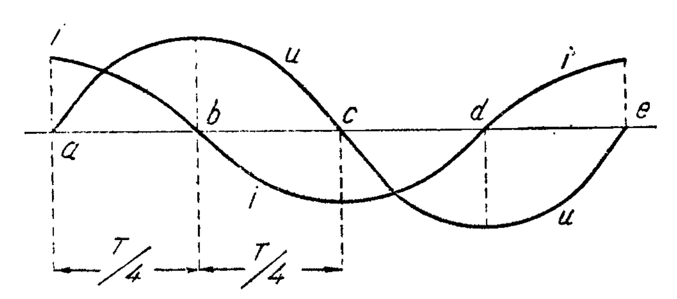
Число же периодов или циклов в одну секунду называется частотой и обратно пропорционально периоду:

$$f = \frac{1}{T}. \tag{17}$$

В электротехнике часто употребляется так называемая угловая скорость повторяемости циклов ω, равная произведению частоты на 2 π:

$$\omega = 2\pi f. \tag{18}$$

Пусть динамомашина (фиг. 14) вырабатывает переменное электрическое напряжение, характеризующееся синусоидой, показанной на фиг. 16 (кривая *u*). Напряжение *U* на обкладках конденсатора в каждый данный момент также будет меняться по величине и по направлению.



Фиг. 16. Синусоиды напряжения и силы тока, протекающего через конденсатор.

Если в течение первой половины периода левая обкладка конденсатора заряжена положительным электричеством то в то же время его правая обкладка будет заряжена отрицательным электричеством.

За вторую половину периода произойдет перезарядка конденсатора; левая обкладка будет заряжена отрицательным электричеством, а правая — положительным. Таким образом конденсатор будет заряжаться то в том, то в другом направлении, и, значит, в цепи конденсатора появится переменный ток.

Характер прохождения переменного тока через конденсатор и его отношение к напряжению видно из фиг. 16 (кривая *i*).

За первую четверть периода, когда напряжение *U* возрастает от нуля до максимума, конденсатор будет заряжаться и ток в цепи будет постепенно уменьшаться до тех пор, пока напряжение не достигнет своего наибольшего значения. В конце первой четверти периода напряжение сети перестает возрастать и тотчас же прекращается дальнейший приток зарядов на конденсатор. Сила тока на мгновение становится равной нулю, а разность потенциалов на емкости достигает максимума. За вторую четверть периода напряжение динамомашины начнет уменьшаться и станет меньше напряжения заряженного конденсатора, а потому конденсатор будет разряжаться и ток изменит свое направление на обратное. К концу

второй четверти напряжение в цепи становится равным нулю (все заряды обкладок стекли в цепь), а сила тока в цепи достигает в это время максимального значения. Дальше напряжение цепи меняет свое направление.

В течение третьей четверти периода напряжение U будет снова возрастать (но теперь уже отрицательно), конденсатор будет заряжаться, и к концу этой части периода (момент d) сила тока будет равна нулю, так как конденсатор снова зарядился до напряжения, равного наибольшему значению напряжения. Наконец, в течение последней (четвертой) четверти периода заряженный конденсатор будет разряжаться, причем сила тока i будет возрастать до наибольшего значения.

Таким образом в течение одного периода будет происходить два раза зарядка и разрядка конденсатора и сила тока будет меняться по кривой i.

Рассматривая фиг. 16, мы видим, прежде всего, что кривые силы тока I и напряжения U в цепи конденсатора не совпадают по фазе, причем сдвиг фаз равен четверти периода: $\frac{T}{4} = 90°$.

В точке a напряжение U равно нулю, а сила тока имеет наибольшее положительное значение; в точке b кривая напряжения достигла максимума, а сила тока равна нулю. Итак, если конденсатор включен в цепь переменного тока, то кривая силы тока опережает кривую напряжения и поэтому говорят, что в цепи конденсатора ток опережает напряжение.

Сила тока, конечно, будет зависеть от количества электричества Q, которое заряжает обкладки конденсатора. Кроме того, она также зависит от круговой частоты (угловой скорости) ω, иначе говоря, от скорости [(частоты) перезарядки конденсатора: чем больше частота, тем чаще будет происходить перезарядка конденсатора, тем большее количество электричества будет участвовать в движении, тем больший, следовательно, ток будет протекать в данной цепи.

Зная напряжение и частоту переменного тока, можно легко определить силу тока, проходящего через конденсатор данной емкости. Силой тока I называется количество электричества, протекающее через проводник в одну секунду. Так как конденсатор перезаряжается количеством электричества Q в 1 сек. ω раз, то средняя, так называемая действующая или эффективная сила тока, перезаряжающего конденсатор и, следовательно, протекающего по цепи, выразится произведением количества электричества на скорость перезарядки:

$$I = Q\omega. \qquad (19)$$

Подставив в это выражение значения Q и ω из формул (8) и (18), мы получим выражение для силы тока, протекающего в цепи с конденсатором:

$$I = 2\pi f C \cdot U = \omega C U. \qquad (20)$$

Здесь сила тока выражена в амперах, частота в герцах[1], емкость в фарадах, а напряжение в вольтах.

Емкостное сопротивление. Так как через конденсатор проходит переменный электрический ток, то можно говорить о сопротивлении конденсатора этому току. Выясним, от чего зависит это сопротивление.

Прохождение тока по электрической цепи подчиняется известному закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (1)$$

Подставив в это выражение значение силы тока, протекающего в цепи с конденсатором, мы получим выражение для сопротивления конденсатора $R_к$:

$$2\pi fCU = \frac{U}{R},$$

откуда

$$R_к = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}, \qquad (21)$$

т. е. сопротивление конденсатора переменному току обратно пропорционально круговой частоте тока и емкости конденсатора. Следовательно, чем больше частота или емкость конденсатора, тем меньше сопротивление конденсатора переменному току.

Прохождение электрического тока по обычному проводнику, как известно, сопровождается неизбежной тратой электрической энергии, которая идет на нагревание проводника (закон Джоуля). Сопротивление такого проводника называется активным («ваттным») или омическим сопротивлением.

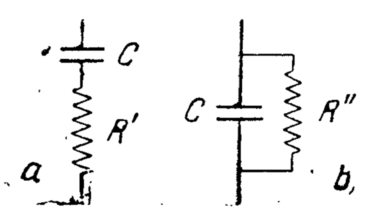
В отличие от этого сопротивления сопротивление конденсатора переменному току называется реактивным (безваттным) вследствие того, что конденсатор практически не расходует энергии: при разряде конденсатора возвращается обратно в цепь энергия, которую он накопил при заряде.

Потери энергии в конденсаторах. Изучая прохождение тока через конденсатор, мы принимали, что в конденсаторах в отличие от обычных проводников не происходит потери энергии, т. е. все количество электричества, которое конденсатором запасается при его заряде, полностью отдается обратно при его разряде.

На самом деле полной отдачи запасенной энергии нет ни в одном конденсаторе. Если конденсатор с любым диэлектриком включить в цепь переменного тока, то часть электрической энергии, запасенной в конденсаторе, все же поглощается самим конденсатором и переходит в тепловую энергию, нагревающую конденсатор. Эта часть энергии носит название потерь в конденсаторе. Потери могут быть вызваны или утечкой тока от одной из обкладок конден-

[1] Герц (обозначается Hz) — число колебаний в секунду, названное в честь физика Генриха Герца (Hertz), открывшего существование электромагнитных волн.

сатора к другой вследствие несовершенства диэлектрика или могут происходить вследствие так называемого электрического гистерезиса (перераспределение и поворот электрических зарядов в диэлектрике в переменном электрическом поле), или вызванных зарядными и разрядными токами потерь на джоулево тепло в проводящих пластинах (обкладках) конденсатора. Кроме того, в некоторых случаях играет роль также и ионизация воздушных пространств в диэлектрике и воздушных прослоек между слоями диэлектрика и металлическими обкладками конденсатора. Потери энергии в конденсаторе весьма нежелательны потому, что они сильно снижают качество конденсатора. Если конденсатор рассчитан на работу при высоком напряжении в цепи переменного тока высокой частоты, то наличие больших потерь может привести к заметному нагреву конденсатора, ухудшению его электрических свойств и в конечном счете выходу его из строя. В конденсаторах, которые предназначены для работы в выпрямляющих фильтрах, наличие больших потерь ухудшает сглаживание пульсации, т. е. ухудшает «фильтрующее действие» конденсатора. В конденсаторах, применяемых в телефонной и радиоприемной аппаратуре, наличие больших потерь способствует излишнему рассеиванию электрической энергии и снижает качество передачи.



Фиг. 17. Схематическое изображение потерь конденсатора.

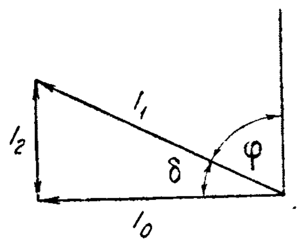
Рассмотренные нами причины, вызывающие потери энергии, в том или ином виде существуют во всех типах электрических конденсаторов. Мы уже указывали, что наличие больших потерь сопровождается нагреванием конденсатора. Прохождение тока по проводнику также сопровождается выделением джоулева тепла. Поэтому все потери в конденсаторе формально могут быть заменены равноценным омическим сопротивлением. Такая замена дает возможность представлять конденсатор в схематически упрощенном виде и значительно упрощает методы количественного определения потерь. Конденсатор представляют обычно, как показано на фиг. 17, как чистую емкость C (без потерь), последовательно или параллельно с которой включено омическое сопротивление, создающее потери энергии, как и у действительного конденсатора. Это сопротивление называется эквивалентным (равноценным) последовательным или параллельным сопротивлением конденсатора.

Потери энергии в конденсаторе чаще всего характеризуются так называемым углом потерь или тангенсом этого угла. Но в некоторых случаях потери энергии в конденсаторе выражают в процентах от его реактивной мощности и называют коэфициентом мощности.

В конденсаторе происходит опережение тока относительно напряжения. В идеальном конденсаторе угол опережения (сдвига) φ между вектором напряжения и вектором силы тока равен 90°.

Но всякий реальный конденсатор, потребляющий некоторую энергию, имеет угол опережения, несколько меньший 90° и тем более отличающийся от 90°, чем больше поглощает энергии сам конденсатор. Следовательно, величина отклонения угла φ от 90° может служить характеристикой потерь энергии в конденсаторе. Эта величина $(90°—\varphi)$ носит название «угла потерь» и обозначается буквой δ.

Предположим, что имеется конденсатор, через который проходит ток, опережающий напряжение на угол φ (фиг. 18). Вектор силы этого тока I_1 разложим на две составляющие: на активную составляющую I_2, совпадающую по фазе с напряжением U, и на реактивную составляющую I_0, которая опережает по фазе напряжение U на угол 90°.



Фиг. 18. Векторная диаграмма, характеризующая потери последовательно.

На основе известных правил геометрии находим, что угол потерь нашего конденсатора $\delta = 90—\varphi$, величина активной составляющей тока $I_2 = I_1 \sin \delta$, а величина реактивной составляющей силы тока $I_0 = I_1 \cos \delta$. Из отношения активной составляющей силы тока к его реактивной составляющей мы находим тангенс угла потерь:

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{I_1 \sin \delta}{I_1 \cos \delta} = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \operatorname{tg} \delta. \qquad (22)$$

Таким образом тангенс угла потерь конденсатора представляет собой отношение активной составляющей силы тока в конденсаторе к его реактивной составляющей.

Для конденсаторов, которые мы схематически можем представить в виде емкости с последовательно включенным омическим сопротивлением (см. фиг. 17,*a*), тангенс угла потерь может быть представлен в виде отношения этого омического сопротивления к реактивному (емкостному) сопротивлению конденсатора:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\text{омическое сопротивление}}{\text{реактивное сопротивление}} = \frac{R'}{\frac{1}{\omega C}} = R'\omega C, \qquad (23)$$

где R' — эквивалентное последовательное сопротивление в омах;
ω — угловая частота, равная $2\pi f$;
C — емкость конденсатора.

Если конденсатор схематически представить в виде емкости с параллельно включенным омическим сопротивлением (см. фиг. 17, *b*), тангенс угла потерь выразится формулой:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{R''\omega C}, \qquad (23')$$

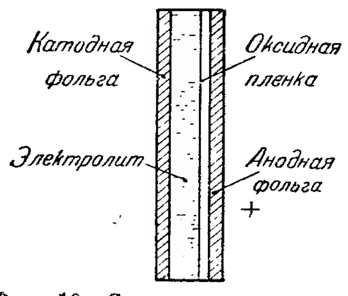
где R'' — параллельное эквивалентное сопротивление.

7. ДИЭЛЕКТРИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В КОНДЕНСАТОРАХ

В настоящее время при изготовлении конденсаторов в качестве диэлектрика применяют, главным образом, воздух, слюду, пропитанную бумагу, оксидную пленку алюминия и др. В соответствии с применяемым диэлектриком конденсаторы бывают воздушные, слюдяные, бумажные и электролитические.

Воздушными называют такие конденсаторы, диэлектриком между обкладками которых является воздух. По электрическим данным воздушные конденсаторы являются наилучшими — имеют малые потери энергии. Основным недостатком конденсаторов этого типа являются их большие размеры.

В слюдяных конденсаторах диэлектриком служит слюда, применяемая в виде листочков соответствующей толщины и размеров. Емкость конденсаторов со слюдяной прокладкой, примерно, в 7 раз больше, чем у воздушных конденсаторов тех же размеров. Это объясняется тем, что диэлектрическая постоянная слюды, примерно, в 7 раз больше, чем воздуха.



Фиг. 19. Схема электролитического конденсатора.

В бумажных конденсаторах диэлектриком служит специальная очень тонкая, так называемая конденсаторная бумага, пропитанная парафином или минеральным маслом. Бумажные конденсаторы по своим электрическим свойствам значительно хуже воздушных и слюдяных конденсаторов.

В электролитических конденсаторах диэлектриком служит тонкий слой окиси алюминия, покрывающий одну из обкладок конденсатора. Одна из обкладок (алюминиевая пластина) электролитического конденсатора подвергается электролитическому окислению в специальном растворе пропусканием постоянного электрического тока. Эта пластина, покрытая оксидной пленкой, называется анодом. Анодная пластина, таким образом, одновременно выполняет роль и одной из обкладок конденсатора и носителя диэлектрика; роль второй обкладки выполняет электролит.

На фиг. 19 схематически изображен конденсатор этого типа. Неоксидированная алюминиевая пластина в электролитическом конденсаторе служит только для подводки тока и не является обкладкой конденсатора. По своим электрическим характеристикам эти конденсаторы уступают другим вышеописанным типам конденсаторов. Тем не менее они получают все большее распространение в силу их дешевизны и большой удельной емкости.

8. ПОТРЕБНОСТЬ В КОНДЕНСАТОРАХ С БОЛЬШОЙ УДЕЛЬНОЙ ЕМКОСТЬЮ. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

С быстрым ростом электро-радиотехники расширяется и область применения электролитических конденсаторов. При этом к конден-

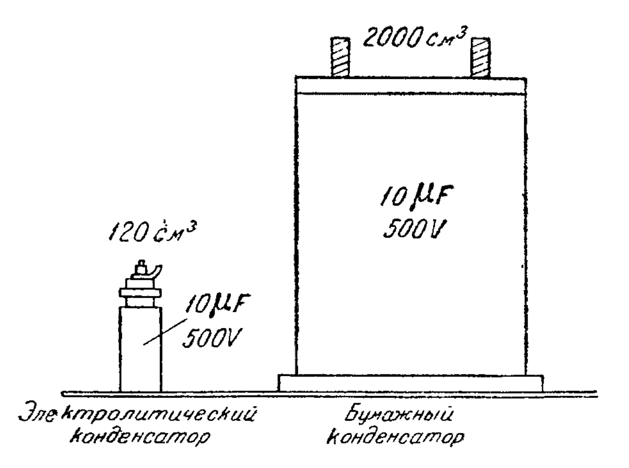
саторам предъявляют все новые и новые требования. Несколько лет тому назад не имели большого значения размеры и вес конденсаторов, применяемых в радиотехнической аппаратуре. В настоящее же время радиотехнике требуются конденсаторы, имеющие уменьшенный вес и малые размеры (габариты). Такие требования вполне справедливы.

Таблица 3

Тип конденсатора	Объем, $см^3$
Воздушный	Около 100 000
Бумажный	100—200
Слюдяной	100—150
Электролитический	10—15

Например в радиоустановках, применяемых для двухсторонней связи на самолетах, имеется большое количество конденсаторов, размеры и, еще более, вес которых имеют огромное значение. Уменьшение объема конденсатора дает возможность изготовлять аппаратуру значительно меньших размеров и меньшего веса, что очень важно для ее размещения на самолете.

Конденсаторы с одними и теми же значениями емкости (1 μF) и рабочего напряжения (500 V) в зависимости от материала, применяемого в качестве диэлектрика, имеют различные размеры. Так, например, воздушный конденсатор по внешним размерам в 10 000 раз больше равноценного ему электролитического конденсатора.



Фиг. 20. Сравнительные объемы бумажного и электролитического конденсаторов.

В табл. 3 приведены удельные объемы конденсаторов различных типов на 500 V рабочего напряжения.

Удельным объемом конденсатора назовем число $см^3$ объема конденсатора, отнесенное к 1 μF.

Из таблицы видно, что наименьший размер имеют электролитические конденсаторы, которые поэтому и находят весьма широкое применение в радиоустановках. В фильтрах выпрямителей многих радиоприемников употребляют также электролитические конденсаторы на 500 V рабочего напряжения и 10 μF емкости. Электролитические конденсаторы такого типа обычно имеют объем 100—150 $см^3$, а воздушный конденсатор на 10 μF емкости и 500 V рабочего напряжения имел бы объем 1 $м^3$.

На фиг. 20 показаны объемы двух типов конденсаторов на 500 V рабочего напряжения и 10 μF емкости.

Основная причина весьма больших размеров воздушных, бумажных и других неэлектролитических конденсаторов по сравнению с электролитическими заключается в том, что оксидная пленка, служащая диэлектриком у электролитического конденсатора, обладает большой пробивной прочностью, поэтому для одного и того же рабочего напряжения и емкости возможно применять более тонкий слой диэлектрика. В электролитических конденсаторах благодаря тому, что слой диэлектрика получается не механическим, а электролитическим способом, толщина слоя может быть получена сколь угодно малой. Поэтому можно сделать низковольтные электролитические конденсаторы громадных емкостей весьма небольших размеров.

Электролитические конденсаторы являются и наиболее легкими. Например, бумажный конденсатор на 500 V рабочего напряжения и 8 μF емкости весит 1420 *г*; электролитический конденсатор таких же емкости и напряжения весит всего 100 *г*. Однако наряду с этими преимуществами электролитические конденсаторы имеют следующие недостатки:

1. Могут быть использованы только в сети постоянного тока или пульсирующего тока, но направленного всегда в одну сторону. Однако в настоящее время имеются неполярные электролитические конденсаторы, которые нашли техническое применение в цепях переменного тока, например для пуска однофазных моторов.

2. Имеют большие потери энергии и значительные отклонения емкости от номинала (от —10% до +50%).

3. Обладают заметным током утечки, который резко возрастает при повышении температуры и напряжения.

IV. ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

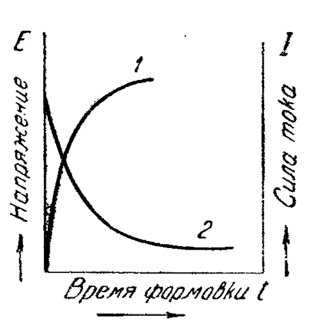
1. ФОРМОВКА ДИЭЛЕКТРИКА КОНДЕНСАТОРА

Основным процессом в изготовлении электролитических конденсаторов является изготовление диэлектрика конденсатора или так называемая формовка слоя диэлектрика. Эта формовка производится в две стадии. Первая подготовительная и основная часть формовки диэлектрика производится на алюминиевой фольге, когда она еще не собрана в конденсатор,— это так называемая первичная формовка. Вторая стадия формовки проходит тогда, когда конденсатор уже собран,— это вторичная формовка или тренировка конденсатора. Низковольтные конденсаторы (до 50 V) часто изготовляют, минуя подготовительный процесс первичной формовки. Первичная и вторичная стадии формовки диэлектрика при изготовлении таких конденсаторов объединяются и производятся тогда, когда конденсатор уже собран.

Вторичная формовка по существу является только закреплением уже сформированного диэлектрика, поэтому основным про-

цессом формования слоя диэлектрика является первичная формовка. В дальнейшем первичную формовку диэлектрика будем называть просто формовкой.

Формовка диэлектрика происходит на алюминиевом аноде путем электролиза в подходящем электролите. Иначе говоря, формовка — это анодное пассивирование алюминия, т. е. образование на нем предохраняющей пленки. Опустив в электролитическую ванну, наполненную раствором борной кислоты, два электрода, одним из которых, и именно анодом, будет алюминиевая пластинка, пропускают через ванну постоянный электрический ток постоянной плотности. Время от времени измеряют напряжение на ванне. Оно все время возрастает до определенной предельной величины. В зависимости от состава раствора на ванне можно поднять напряжение до очень большой величины. Так, например, Гюнтершульце удавалось при соблюдении определенных условий доводить напряжение ванны до 1950 V.



Фиг. 21. Изменение силы тока *2* и напряжения *1* на формовочной ванне со временем.

Можно на ванну подать сразу большое напряжение и следить за изменением силы тока. В этом случае будет наблюдаться сначала большой бросок силы тока, а затем его постепенное уменьшение. На фиг. 21 графически показаны наблюдаемые на ванне процессы. Кривая *1* показывает, как изменяется напряжение на ванне, если мы будем поддерживать постоянную силу тока, а кривая *2* показывает, как изменяется сила тока, если поддерживать постоянное напряжение. Видно, что напряжение сначала растет очень быстро, а затем его рост начинает замедляться. То же самое происходит и с силой тока: падение идет сначала быстро, потом замедляется, пока не остановится на каком-то определенном минимальном значении. Это значит, что на поверхности алюминия появляется пленка окиси или гидроокиси алюминия (многие исследования показывают, что пленка состоит из смеси этих окислов), которая препятствует прохождению электрического тока. Однако сопротивление, которое представляет эта пленка прохождению тока, является необычным. В то время, когда алюминиевая пластинка, покрытая оксидной пленкой, приключается к плюсу, т. е. включается анодно, пленка представляет очень большое сопротивление току. Если же эту пластинку сделать катодом, т. е. приключить ее к отрицательному полюсу, ток будет проходить почти такой же величины, как если бы эта пластинка не была покрыта оксидной пленкой.

Таким образом, если включить алюминиевую пластинку с отформованной на ней покровной пленкой в цепь переменного тока, то эта пластинка в одну сторону будет пропускать ток, а в другую сторону нет. Следовательно, оксидная пластинка будет в ы п р я м л я т ь переменный ток. Эта особенность пленки пропускать ток

в одну сторону, а в другую задерживать носит название **вентильного (клапанного) эффекта**. Вентильный эффект алюминиевой пленки используется в электротехнике для устройства электролитических выпрямителей переменного тока. В электролитических конденсаторах оксидная пленка используется только в качестве диэлектрика и вентильное ее свойство придает этим конденсаторам ту особенность, что они могут служить только для постоянного тока или пульсирующего тока, но направленного в одну сторону.

Механизм образования пленки и ее структура. Выше было выяснено, что металл, опущенный в раствор, отщепляет от себя и отдает в раствор некоторое количество своих ионов, которые находятся вблизи его поверхности. Следовательно, если мы поместим в электролитическую ванну в качестве электродов алюминиевые пластинки, то вблизи их поверхности всегда будет иметься некоторое количество ионов Al^{+++}.

После того как к электролитической ванне приложится напряжение, ионы электролита под влиянием электрического поля устремятся к электродам. Отрицательные ионы — в общем случае мы можем принять, что это ионы OH^-—подойдут к аноду и соединятся там с алюминиевыми ионами, образуя гидроокись алюминия:

$$Al^{+++} + 3OH^- = Al(OH)_3.$$

На место соединившихся с алюминиевыми ионами ионов OH^- приходят сейчас же новые, и процесс продолжается все время, пока протекает ток. Если бы образующийся продукт соединения был растворим в электролите, то происходил бы процесс растворения алюминия на аноде. Так на самом деле процесс и протекал бы, если бы мы производили электролиз раствора $NaOH$ достаточной концентрации с алюминиевым анодом. Однако, так как в формовочном электролите продукт соединения нерастворим или растворим очень мало, а к тому же в прианодном слое будет создаваться очень большая его концентрация, то это соединение будет осаждаться на поверхности анода. Не исключена возможность, что благодаря очень сильному электрическому полю анионы электролита соединяются непосредственно с металлическим алюминием анода, не проходя стадии предварительного растворения металла.

Так протекает первая стадия покрытия анода пленкой. В эту стадию ее образования пленка распространяется, главным образом, по поверхности. Так как образующаяся пленка является диэлектриком и с начала электролиза очень быстро распространяется по поверхности, то сопротивление анода быстро растет и, следовательно, сила тока быстро падает. Если бы пленка могла покрыть поверхность анода полностью плотным, сплошным, беспористым слоем, то после образования первого слоя анионы не могли бы больше проникнуть к чистому алюминию, дальнейший рост пленки в толщину прекратился бы и сила тока резко упала бы до значения, обусловливаемого проводимостью самого оксида алюминия.

Однако пленка не может окончательно закрыть алюминий. Вследствие различного молекулярного объема вещества пленки и алюминия, а также вследствие различных коэфициентов расширения, между металлом и пленкой будет существовать механическое натяжение, которое приводит к растрескиванию пленки, т. е. к образованию трещин и пор, которые могут доходить до оголенного алюминия. Поры образуются еще и потому, что продукты соединения осаждаются на поверхность анода не отдельными молекулами, а в виде коллоидальных частиц, представляющих большие скопления молекул, которые, осаждаясь, не могут совершенно плотно пристать друг к другу, и между ними остаются мельчайшие поры. Таким образом слой гидроокиси алюминия получается не совершенно сплошным, а пористым. По подсчетам В. Мюллера площадь этих пор составляет от 10^{-3} до 10^{-5} части поверхности всей пленки. Эти поры дают возможность электролиту проникать до оголенного алюминия и производить дальнейшую формовку пленки в толщину.

Процесс роста пленки в толщину можно представить себе таким образом: анионы электролита в порах соединяются с алюминием, осаждаются на нем, но под влиянием тех же механических причин появляются на их место новые и новые поры, благодаря чему и идет рост пленки в толщину. Можно сказать, что общая площадь пор является как бы показателем равновесия существующего напряжения между металлом и окислом. Когда алюминиевый электрод включен, как анод, то под действием сильного электрического поля пленка прижимается к алюминию, испытывая очень сильное давление.

По вычислениям Гюнтершульце во время формовки среднее напряжение электрического поля доходит до $1{,}24 \cdot 10^7$ V/*см*; электростатическое давление, соответствующее этой силе поля, равно 490 *ат*, т. е. на каждый квадратный сантиметр поверхности давит сила в 490 *кг*. Такое громадное давление уменьшает силы, под влиянием которых пленка образует поры, так как давление направлено против этих сил. Кроме того, происходит беспрерывное образование пленки, закрывающей поры. Поэтому, когда алюминиевая пластинка включена как анод, то благодаря более узким, под влиянием сжатия, порам и меньшему их количеству, вследствие беспрерывного осаждения в них гидроокиси алюминия, в этом случае пленка представляет большее сопротивление электрическому току, чем в том случае, когда она включена как катод, т. е. когда силы электростатического притяжения отсутствуют.

Испытывая такое большое давление, состав и структура пленки также не могут оставаться без изменений. Если вначале пленка состояла из гидрата окиси алюминия $Al(OH)_3$, то постепенно гидроокись будет переходить в окись алюминия Al_2O_3, пленка будет постепенно делаться все более плотной, будет все меньше пропускать формующий ток, пока сила тока не упадет до очень малой величины. По достижении некоторого напряжения наиболее слабые места пленки начинают пробиваться и на аноде появляется искрение. Так можно себе представить механизм образования оксидной пленки на алюминии.

Ознакомившись с процессом образования пленки, перечислим свойства, которые характеризуют ее как диэлектрик, используемый для изготовления электролитических конденсаторов.

К таким ее свойствам относятся:

1) диэлектрическая постоянная,
2) толщина,
3) сопротивление электрическому току,
4) прочность на электрический пробой.

Диэлектрическая постоянная (Д. П.) пленки. Диэлектрическая постоянная пленки ε, вычисленная Гюнтершульце различными методами, равна 7,45. Как видно из табл. 2 (стр. 22), Д. П. окисной пленки равна диэлектрической постоянной слюды и значительно превышает Д. П. таких диэлектриков, как бумага, парафин, воск, шеллак и т. п.

Толщина пленки. Толщина пленки окиси алюминия зависит от напряжения, при котором пленка отформована: чем выше напряжение формовки, тем толще пленка. Для зависимости толщины пленки от формующего напряжения Гюнтершульце предложил следующую формулу:

$$\delta = 1{,}05 \cdot 10^{-7}\, U_{\Phi}, \tag{24}$$

где δ — толщина пленки в сантиметрах, а U_{Φ} — напряжение формовки в вольтах.

По измерениям различных исследователей эта толщина имеет порядок от 10^{-4} до 10^{-6} сантиметра. Такой тонкий слой диэлектрика механическим путем получить невозможно.

При производстве электролитических конденсаторов необходимо знать толщину пленки для того, чтобы правильно выбрать размеры анодной пластины для заданной емкости. Но определять с этой целью всякий раз толщину пленки неудобно. К тому же готовые конденсаторы должны работать при некотором определенном напряжении, а для этого их диэлектрик (пленку) надо отформовать при некотором более высоком напряжении, чтобы диэлектрик был способен легко выдержать свое рабочее напряжение. Толщина же пленки, как было указано, зависит от напряжения формовки. Поэтому удобнее при определении размеров пластины для данной емкости исходить из формовочного напряжения.

Площадь анодной пластины в квадратных сантиметрах для данной емкости C, выраженной в микрофарадах, в зависимости от формовочного напряжения U_{Φ} выражается следующей формулой:

$$q' = \frac{C \cdot U_{\Phi}}{12{,}56}. \tag{25}$$

Толщину пленки можно определить из емкости конденсатора:

$$\delta = \frac{\varepsilon q}{4\pi C}, \tag{9}$$

где ε — диэлектрическая постоянная, равная 7,45;
q — площадь пленки в *см*²;
C — емкость конденсатора в *см*.

Если емкость измерена в микрофарадах, то результат надо разделить на $9 \cdot 10^5$. Подставив все эти величины, формулу можно переписать в следующем виде:

$$\delta = \frac{6,59q}{10^7 C}. \tag{26}$$

Емкость оксидного слоя в зависимости от напряжения формовки можно получить из формул (26) и (24), приравняв их:

$$1,05 \cdot 10^{-7} U_ф = \frac{6,59q}{10^7 C},$$

откуда

$$C = \frac{6,59q}{1,05 \cdot 10^{-7} \cdot 10^7 U_ф} = \frac{6,28q}{U_ф} \text{ микрофарад.} \tag{27}$$

Из формулы видно, что емкость оксидного слоя обратно пропорциональна напряжению, при котором отформован этот слой.

В формуле (27) q — площадь оксидной пленки. Если бы оксидная пластина была покрыта пленкой только с одной стороны, то это была бы и площадь последней. Но так как в электролитических конденсаторах анодная пластинка заформована с обеих сторон, то результаты вычисления нужно умножить на 2, т. е.

$$C = \frac{12,56q'}{U_ф} \text{ микрофарад,} \tag{25'}$$

где q' — площадь одной стороны отформованной алюминиевой пластины.

Оксидная пленка в зависимости от толщины имеет различную окраску; эта окраска, правда, мало заметна, но при известном навыке ее можно различить. В практике этим часто пользуются, чтобы отличить пластины различной формовки. Цвета пленок носят название интерференционных цветов.

Сопротивление пленки электрическому току. Удельное сопротивление оксидной пленки на алюминии не является величиной строго постоянной и зависит как от способа ее формовки, так и от условий, в которых ведется измерение. Прежде всего нужно различать сопротивление пленки в сухом виде, вне электролита, и ее сопротивление в электролите.

Сопротивление пленки в электролите сильно зависит от направления тока. Если оксидированная алюминиевая пластинка включена в качестве анода, то тогда пленка представляет большое сопротивление электрическому току. Величина удельного сопротивления в этом случае составляет примерно 10^{15}—10^{14} *ом/см*^{3}. В катодном направлении, наоборот, она представляет гораздо меньшее сопротивление.

Прочность пленки на пробой. Прочность пленки на пробой в электролите, и именно в анодном направлении, очень высока; прочность сухой пленки значительно ниже. В электролите пробой пленки наблюдается в виде искрения на аноде. Ниже будут подробно рассмотрены различные случаи искрения на аноде, сейчас же скажем только, что, формуя алюминий в каком-либо растворе с постоянной

плотностью тока, можно дойти до такого напряжения, при котором от электролита к алюминию начнут проскакивать искры. Эти искры, сначала небольшие и редкие, постепенно увеличатся и будут усевать весь анод. Это и есть пробой пленки.

Заметив напряжение на ванне, при котором заискрил анод, можно вычислить пробивную напряженность электрического поля в вольтах на сантиметр толщины пленки, разделив это напряжение на толщину пленки.

Толщина пленки в зависимости от формовочного напряжения выражается формулой:

$$\delta = 1,05 \cdot 10^{-7} U_ф \text{ см.} \quad (24)$$

Если принять за формовочное напряжение $U_ф$ такое, при котором заискрил анод, то пробивную напряженность $E_{пр}$ в общем случае можно вычислить следующим образом:

$$E_{пр} = \frac{U}{\delta} = \frac{U}{1,05 \cdot 10^{-7} U} = 0,952 \cdot 10^7 \text{ V/см.}$$

Оксидная пленка имеет, примерно, такую же пробивную прочность, как и слюда (см. табл. 4).

Таблица 4

Материал	Пробивная напряженность V/*см*
Воздух	$3 \cdot 10^4$
Слюда	$1 \cdot 10^7$
Стекло	$3 \cdot 10^6$
Фарфор	$4 \cdot 10^5$

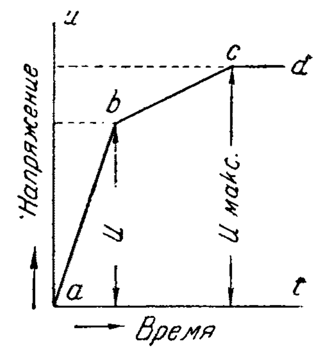
Электрический пробой оксидной пленки во многом отличается от пробоя других диэлектриков. Пробой твердого диэлектрика обычно сопровождается его разрушением.

Разрушенный благодаря пробою диэлектрик уже не годен к употреблению. Для оксидной пленки на алюминии этого не наблюдается. В электролите пробой выражается искрением на аноде. Однако, если мы снизим несколько напряжение, то увидим, что пленка ведет себя совершенно так же, как и до искрения (пробоя). Это показывает, что одновременно с пробоем пленки происходит и ее новая заформовка, так что целость пленки сохраняется. При использовании оксидной пленки в качестве диэлектрика конденсаторов это ее свойство восстанавливаться имеет очень большое значение. Электролитический конденсатор благодаря этому свойству пленки, за исключением некоторых случаев, которые будут разобраны ниже, не боится пробоя: если пробой и получится, то диэлектрик сам себя исправит и при снижении напряжения конденсатор опять будет работать нормально.

В сухом виде оксидная пленка после пробоя не имеет возможности самовосстанавливаться. Внешне пробой протекает так же, как и у других твердых диэлектриков, а не в виде искрения, как у пленки в электролите.

Если во время формовки к алюминиевому аноду поднести металлический стержень, то в месте соприкосновения металла с пленкой моментально произойдет пробой; получится короткое замыкание. Если вместо металлического стержня будет взята ртуть, то и в этом

случае мгновенно возникнет пробой. Это происходит не потому, что оксидная пленка повреждается механически. В механическом отношении пленка представляет очень большую твердость, примерно равную твердости корунда. Гюнтершульце это явление объясняет следующим образом: «Пленка в анодном направлении выдерживает более высокое напряжение, чем в проводящем направлении, так как в анодном направлении электроны освобождаются из электролита, для чего нужна очень высокая напряженность поля, в то время как в металле имеются свободные электроны. Если, таким образом, электролит замещается металлом, который входит в соприкосновение с пленкой, то в этом случае последняя может выдержать лишь весьма небольшое напряжение, соответствующее тому, которое выдерживается в проводящем направлении». Иначе говоря, пробой при соприкосновении с металлом соответствует сухому пробою пленки.



Фиг. 22. Изменение напряжения на формующемся аноде.

Напряжение искрения. Как уже было сказано, пробой пленки в электролите проявляется в виде искрения на аноде. Поэтому в литературе установилось за ним название искрения, и пробивное напряжение называют напряжением искрения.

Процесс формовки в общем виде проходит так, как это представлено на фиг. 22. Если мы будем поддерживать постоянную силу тока, то напряжение на аноде (то же самое, что и на ванне) сначала будет возрастать быстро (отрезок *ab*). Затем рост его несколько замедлится (отрезок *bc*) и, наконец, возрастание напряжения прекратится совсем (отрезок *cd*).

С начала формовки анод начинает светиться бледноголубоватым светом. Чем больше плотность тока, тем ниже напряжение формовки, при котором свечение заметно. Это свечение также тем ярче, чем больше в формуемом алюминии примесей других металлов. Конечно, свечение можно наблюдать только в затемненном месте; при дневном освещении его заметить невозможно. Это свечение, сначала очень слабое, по мере возрастания напряжения усиливается. По достижении некоторого определенного напряжения на аноде вдруг появляются очень мелкие искры. Этому соответствует точка *b* на фиг. 22. При своем возникновении эти мелкие искры еще не производят звука и слабо светятся. С дальнейшим ростом напряжения искры эти все время усиливаются, пока не перейдут в менее многочисленные, но за то более крупные искры с характерным потрескиванием, легко различимым на-слух. С этого момента, как бы долго мы не продолжали формовку, напряжение уже возрастать не будет. Это напряжение соответствует точке *c* на фиг. 22.

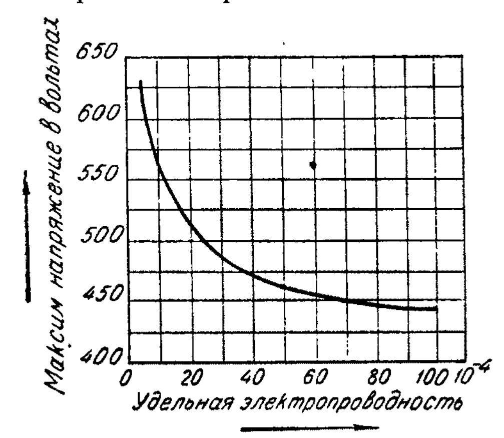
Напряжение, соответствующее точке *b*, называют напряжением искрения, а соответствующее точке *c* — максимальным напряжением.

Таким образом напряжением искрения называется такое напряжение, при котором во время формовки появляются первые искры и скорость формовки уменьшается.

Исследования показывают, что напряжение искрения не зависит от плотности формующего тока и немного возрастает с повышением температуры.

Напряжение искрения зависит от величины напряжения предварительной формовки анода; чем последнее выше, тем выше искровое напряжение. Объяснить это можно тем, что при более высоком напряжении оксидный слой, очевидно, имеет возможность укрепиться значительно больше, чем при более низком.

Напряжение искрения в сильной мере зависит от концентрации и от рода электролита. Оно понижается с повышением концентрации электролита и повышается с уменьшением концентрации. При этом имеется в виду не общая концентрация молекул, а концентрация ионов.



Фиг. 23. Изменение максимального напряжения в зависимости от электропроводности электролита.

Максимальное напряжение также не зависит от плотности тока и температуры электролита. Правда, это справедливо только в том случае, когда электролит с повышением температуры не растворяет пленку. Для алюминия же в большинстве случаев с повышением температуры начинается растворение пленки и поэтому наблюдается некоторое снижение максимального напряжения.

Максимальное напряжение в сильной степени зависит от электропроводности электролита; чем больше электропроводность, тем ниже максимальное напряжение. Характер этой зависимости для пленки алюминия, отформованной в 0,05%-ном растворе буры до максимального напряжения 720 V, представлен на фиг. 23. Пленка, отформованная до определенного напряжения, при испытании ее в электролитах различной электропроводности показывает различное максимальное напряжение.

При максимальном напряжении на аноде выделяется очень много газа, состоящего из водорода и кислорода. Эти газы появляются в результате разложения воды электролита действием электрических искр. При максимальном напряжении в электролите появляется также муть, состоящая из гидроокиси алюминия. Эта муть является результатом разрушения искрами оксидной пленки.

Скорость формовки. При производстве электролитических конденсаторов важно, во-первых, получить наибольшую скорость фор-

мовки диэлектрика конденсатора и, во-вторых, наибольший коэфициент полезного действия процесса.

Формовка оксидной пленки, как и всякий процесс электролиза, подчиняется законам Фарадея.

Для процессов электролиза Фарадей установил следующие законы:

1. Количество вещества, выделяющееся на электроде, пропорционально количеству электричества, прошедшему через электролит.

2. Количества вещества, выделяемые из различных электролитов током одной и той же силы в течение одного и того же времени, относятся между собой как химические эквиваленты тех же веществ.

Законы Фарадея легко понять с точки зрения электролитической диссоциации, разобранной выше.

При электролизе электрический ток переносится ионами. Понятно, что чем большее количество электричества пройдет через электролит, тем большее количество ионов выделится на электродах. Электричества пройдет тем больше, чем больше сила тока I и чем большее время t длится электролиз. Таким образом, обозначив количество выделившегося на электродах вещества в граммах через M, мы можем написать:

$$M = mIt. \tag{28}$$

Здесь m — коэфициент пропорциональности.

Если через электролит проходит ток силой в один ампер, то в течение одной секунды он выделит m граммов данного вещества. Это количество вещества называется **электрохимическим эквивалентом** данного вещества.

Каждое вещество имеет свой электрохимический эквивалент. Например для серебра он равен 1,118 *мг*, для меди — 0,329 *мг*, для кислорода — 0,082904 *мг* и т. д.

Многие исследования показывают, что пленка состоит из окиси Al_2O_3. Таким образом, зная толщину пленки и считая пленку сплошной, беспористой, можно вычислить ее вес, а отсюда узнать и количество кислорода, потребное для ее образования. По количеству кислорода легко потом подсчитать силу тока и время, необходимые для формовки пленки данной толщины.

Приняв же во внимание, что толщина пленки зависит от формовочного напряжения, можно подсчитать время и плотность тока, потребные для формовки анодной пластины размера q' до формовочного напряжения $U_ф$ по следующей формуле:

$$It = 4{,}652 \cdot 10^{-3}\, U_ф\, q'. \tag{29}$$

Нужно иметь в виду, что пленка на самом деле, как показывают многие опыты, не сплошная, а пористая; но, принимая ее за сплошную, мы не делаем большой ошибки. По многим подсчетам площадь пор составляет от 10^{-3} до 10^{-5} части всей поверхности пленки. Если принять для удобства расчета, что поры цилиндрические, то, сле-

довательно, объем их будет составлять от 10^{-3} до 10^{-5} всего объема пленки. Возьмем среднее число 10^{-4}; в пересчете на проценты это составит 0,01%. Таким образом, считая пленку сплошной, мы совершаем столь незначительную ошибку, что ею можно безболезненно пренебречь.

Толщину пленки можно вычислить, исходя из напряжения формовки: $\delta = 1{,}05 \cdot 10^{-7}\, U_ф$. Если площадь пленки q, то ее объем выразится:

$$q\delta = 1{,}05 \cdot 10^{-7}\, U_ф\, q \text{ см}^3.$$

Удельный вес оксида Al_2O_3, $\gamma = 3{,}91$; вес пленки в таком случае будет:

$$M_{Al_2O_3} = 1{,}05 \cdot 3{,}91 \cdot 10^{-7}\, U_ф\, q.$$

Вычислим теперь из общего веса пленки вес кислорода M_{O_2}. Молекулярный вес Al_2O_3 равен 102,2; атомный вес кислорода равен 16. Очевидно, что вес кислорода в пленке будет так относиться к общему весу пленки, как утроенный атомный вес кислорода относится к молекулярному весу окиси алюминия:

$$\frac{M_{O_2}}{M_{Al_2O_3}} = \frac{48}{102{,}2},$$

откуда

$$M_{O_2} = \frac{48}{102{,}2} M_{Al_2O_3} = \frac{48 \cdot 1{,}05 \cdot 3{,}91 \cdot 10^{-7}}{102{,}2}\, U_ф\, q \text{ г}.$$

Количество электричества в ампер-секундах, потребное для выделения такого количества кислорода, можно получить, разделив вес выделяющегося кислорода на его электрохимический эквивалент:

$$It = \frac{M_{O_2}}{m_{O_2}} = \frac{48 \cdot 1{,}05 \cdot 3{,}91 \cdot 10^{-7}}{102{,}2 \cdot 0{,}000082904}\, U_ф\, q \text{ ампер-секунд},$$

или после вычисления:

$$It = 2{,}326 \cdot 10^{-3}\, U_ф\, q. \qquad (29')$$

В формуле (29′) q — поверхность оксидной пленки. В практике производства конденсаторов обычно имеют дело не с поверхностью оксидной пленки, а с размером анодной алюминиевой пластины. Так как алюминиевая пластина формуется с обеих сторон, то, вводя в формулу размер пластины q', мы должны умножить результат на 2. В окончательном виде формула будет иметь такой вид:

$$It = 4{,}652 \cdot 10^{-3}\, U_ф\, q' \text{ ампер-секунд}. \qquad (29)$$

При пользовании этой формулой необходимо помнить, что она выведена для случая, когда весь образующийся кислород вступает в соединение с алюминием, т. е. для случая, когда коэфициент полезного действия равен 100%. На самом деле (что будет разобрано ниже) коэфициент полезного действия ниже 100% и зависит от условий формовки.

Для примера подсчитаем время и количество энергии, потребные для отформовки наиболее распространенного конденсатора в 10 микрофарад на 450 V рабочего напряжения. Оксидная пленка такого конденсатора формуется до напряжения 560 V. Из формулы (25) вычислим размер анодной пластины:

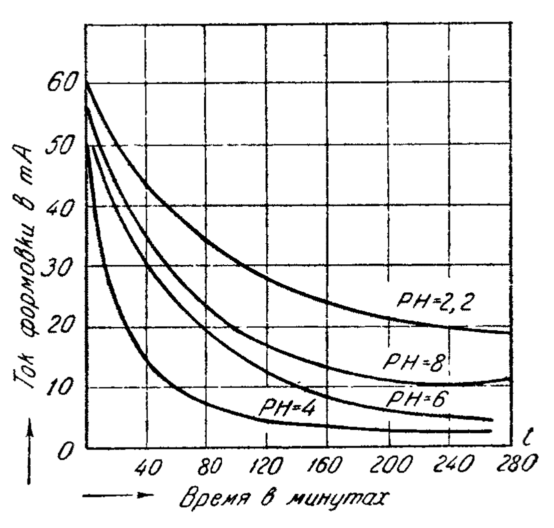
$$q' = \frac{10 \cdot 560}{12{,}56} = 446 \ см^2.$$

Пусть плотность тока формовки составляет 1 mA/$см^2$; сила тока I, следовательно, будет равна 0,446 A.

Подставив в формулу (29) числовые значения, получим время в секундах:

$$t = \frac{4{,}652 \cdot 10^{-3} \cdot 446 \cdot 560}{0{,}446} = 2620 \text{ сек., т. е. около 44 мин.}$$

Скорость формовки в зависимости от температуры. Относительно зависимости скорости формовки от температуры ванны нет еще установившихся взглядов; часть исследователей (Гюнтершульце, Годсей) утверждает, что скорость формовки с повышением температуры уменьшается; другие исследователи (Симон, Яух, Ренне. Шляхтер) нашли, что скорость формовки в пределах от 0 до 100° не зависит от температуры. Такое расхождение, очевидно, является следствием того, что исследователи работали с различными электролитами.



Фиг. 24. Зависимость скорости формовки от pH формовочного электролита.

Вообще говоря, можно ожидать уменьшения скорости формовки при повышении температуры при условии, что электролит, употребляемый для формовки, с повышением температуры растворяюще действует на пленку. Если же в этих условиях электролит мало действует на пленку, то можно ожидать, что скорость формовки с повышением температуры не уменьшится. Это подтверждается изучением скорости формовки при различных pH формовочного раствора. На фиг. 24 показано падение силы тока при формовке постоянным напряжением в электролитах, имеющих различные значения pH. Видно, что в пределах от pH = 4 до pH = 6 скорость формовки наибольшая; за этими пределами она уменьшается. При большой кислотности раствора, т. е. при pH<4, и при щелочности

раствора, определяющейся $pH>7$, электролит, очевидно, начинает растворять пленку и поэтому скорость формовки уменьшается. Чаще всего формовку производят при температурах, близких к 100°, и реже при более низких температурах. Но это больше объясняется другими, главным образом конструктивными условиями, чем соображениями, вытекающими из скорости формовки.

Концентрация электролита, как установлено, не влияет на скорость формовки.

2. ЗАВОДСКИЕ СПОСОБЫ ФОРМОВКИ ДИЭЛЕКТРИКА

Как уже сказано выше, формовка диэлектрика конденсатора разделяется на две стадии. Наиболее длительной является вторичная формовка. Она продолжается, в зависимости от условий и требований, предъявляемых к конденсаторам, от 4 до 8 час. Плотность тока при вторичной формовке малая во избежание нагрева и порчи конденсаторов. Время первичной формовки очень сильно колеблется и составляет от 3 мин. до 8 час., а иногда и больше. При этом плотность тока можно употреблять сколь угодно большую. Единственной, пожалуй, преградой для повышения плотности тока является опасность сгорания алюминиевой фольги в местах входа тока.

В процессе производства электролитических конденсаторов первичная формовка является наиболее важной операцией, так как от качества заформовки диэлектрика конденсатора зависят в дальнейшем все его свойства.

Как правило, первичная формовка производится постоянным или пульсирующим выпрямленным током в электролитах, представляющих собой водные растворы слабых кислородсодержащих кислот, или их солей, или того и другого вместе.

Формовка может производиться следующими способами:

1. При постоянной плотности тока и меняющемся напряжении.
2. При постоянном напряжении и меняющейся силе тока.
3. Статическими методами, когда формующаяся фольга в течение всего процесса формовки остается неподвижной.
4. Динамическими методами, когда в процессе формовки фольга все время протягивается через ванну.
5. Ступенчатая, когда формующаяся фольга проходит последовательно ряд ванн с повышающимися ступенями напряжением.
6. При различной температуре формовочного электролита.

Статическая формовка. Статическая формовка производится в электролитической ванне — четырехугольном баке, заполненном формовочным электролитом. В баке подвешивается на раме алюминиевая фольга, подлежащая формовке.

Фольга иногда имеет форму полосок, размер которых рассчитан на один конденсатор или на часть конденсатора. Такая фольга прикрепляется к раме зажимами-щипчиками (фиг. 25). Иногда это очень длинный кусок фольги, который наматывается на раму; в таком случае рама представляет доску с укрепленными на ней алюминиевыми шпинделями, на которые наматывается фольга. Это делается в том случае, если формуется фольга для сухих конденса-

торов. Аноды жидких конденсаторов формуют изогнутыми в форме гармоники или какой-либо иной с приклепанными уже к ним выводами (см. фиг. 32). Поэтому рамы для таких анодов устраивают таким образом, чтобы на них можно было укрепить заданное количество анодов за их выводные контакты.

Формовочные ванны обычно изготовляют из листового алюминия толщиной 3—4 *мм*. Реже их делают медными. Выбирают материал для ванн такой, чтобы он не растворялся формовочным электролитом и при своем растворении не загрязнял вредными примесями электролит. Если ванна медная, то нужно на ней все время поддерживать



Фиг. 25. Формовка анодных пластин.

поляризующее напряжение, чтобы избежать растворения меди и загрязнения электролита во время бездействия ванны. В алюминиевой ванне эти предосторожности излишни, так как растворенный алюминий не мешает процессу формовки. Алюминиевые ванны разъедаются, главным образом, в процессе формовки, если катионами электролита являются щелочные металлы.

Если формовка ведется при низких температурах, то в ванне устраивается охладитель. При формовке на средних и высоких температурах устраиваются охладитель и обогреватель. Охладительно-обогревательная система выполняется или в виде змеевика, сделанного из того же металла, что и ванна, по которому при желании может протекать или холодная или горячая вода, или же вместо змеевика на ванну одевают кожух, между стенками которого и стенками ванны может пропускаться холодная или горячая вода. Иногда, если формовка ведется при высокой температуре, устраивают электрический обогрев под ванной.

Источником тока при формовке служит динамомашина. Положительвый полюс источника тока подводится к раме ванны, а отрицательный — прямо к корпусу ванны. Таким образом, корпус

служит катодом, а формуемая фольга — анодом. Так как на ванну может подаваться большое напряжение, (до 600 V), то рама от корпуса ванны должна быть хорошо изолирована.

Над каждой ванной должен быть щиток с амперметром и вольтметром, показывающими напряжение на ванне и силу тока, проходящего через нее.

Статическую формовку можно проводить или при постоянной плотности тока или при постоянном напряжении. При формовке с постоянным напряжением устанавливают на генераторе нужное напряжение и включают ванну. Получившаяся сначала большая сила тока будет постепенно падать, пока не дойдет до величины, при которой прекращают формовку. Формовку прекращают обычно тогда, когда плотность тока составляет около 0,1 mA/*см*^{2} поверхности анода. Формовка в таких случаях длится 30—50 мин.

При формовке же постоянной плотностью тока на ванну сначала подают такое напряжение, чтобы проходил нужной силы ток, и поддерживают эту силу тока до тех пор, пока напряжение не поднимется до желаемого значения. После этого поддерживают постоянное напряжение и дают силе тока падать. После достижения током установленной величины, такой же, как и в первом случае, формовка считается законченной.

По окончании формовки ванну отключают, вынимают заформованную фольгу, обмывают, сушат и передают на сборку или на хранение.

При формовке как с постоянной плотностью тока, так и при постоянном напряжении, когда сила тока на ванне сильно уменьшится против первоначального значения, невыгодно использовать мощный генератор, который работает с полной нагрузкой только в начальной стадии формовки. Поэтому к концу формовки обычно ванны переключают на менее мощный генератор, а более мощный генератор в это время включают на вновь заряженную ванну.

Формовка с постоянной плотностью тока длится обычно 4—8 час. За последнее время начинают применять так называемые «отдыхи»: формующуюся фольгу периодически отключают и оставляют на некоторое время без напряжения. Чем выше напряжение формовки, тем чаще и продолжительнее отдыхи. По данным одной из американских фирм процесс формовки с отдыхами должен производиться в три стадии:

Первая стадия — формовка постоянной плотностью тока. Напряжение на ванне поднимают до заданного напряжения формовки $U_ф$. В этой стадии формовки при достижении указанного в табл. 5 напряжения делают перерыв на 1—2 мин. (отключают напряжение).

Вторая стадия — после достижения формовочного напряжения поддерживают напряжение постоянным и дают падать силе тока до установленного значения, при котором снимают аноды с формовки. В этой стадии формовки через каждые 20 мин. формовку прерывают на 2—5 мин.

Таблица 5

Напряжение формовки $U_ф$	Напряжения, при которых устанавливают перерывы на 1—2 мин.
От 300 до 400 V	При 300 V и $U_ф$
» 400 » 500 V	» 300 V, 400 V и $U_ф$
» 500 » 600 V	» 300 V, 400 V, 500 V и $U_ф$

Третья стадия — по достижении установленной силы тока утечки с ванны снимают напряжение и аноды некоторое время оставляют в горячем электролите без напряжения. После некоторого отдыха на ванну вновь подают напряжение и пластины выдерживают до тех пор, пока при $U_ф$ ток утечки не достигнет заданного значения, величина которого несколько ниже, чем в предыдущем случае. Затем дают анодам следующий отдых без напряжения, и цикл повторяется вновь. При этом каждый последующий отдых продолжается дольше, чем предыдущий. Количество отдыхов и их длительность определяются формовочным напряжением и емкостью формуемых анодных пластин и приведены в табл. 6.

Таблица 6

Емкость формуемой анодной пластины, μF	Формовочное напряжение $U_ф$, V	Количество отдыхов	Длительность отдыхов в часах			
			1-го	2-го	3-го	4-го
< 20	< 200	0	0	0	0	0
≥ 20	< 200	1	1	0	0	0
< 20	210—310	1	1	0	0	0
≥ 20	210—310	2	1	2	0	0
< 20	310—450	2	1	2	0	0
≥ 20	310—450	3	1	2	3	0
< 20	> 450	3	1	2	3	0
≥ 20	> 450	4	1	2	3	4

Отдыхи весьма благотворно влияют на процесс формовки и повышают качество конденсаторов. Конденсаторы, аноды которых отформованы с отдыхами, имеют, во-первых, меньший ток утечки, во-вторых, их ток утечки быстро спадает до очень малых значений при включении конденсатора под напряжением. Кроме того, такие конденсаторы легко выдерживают работу при повышенных температурах и мало подвержены процессу расформовки в период бездействия. В табл. 7 приводятся сравнительные данные испытаний электролитических жидкостных (мокрых) конденсаторов, приготовленных при формовке с отдыхами и без отдыхов.

Конденсаторы предварительно выдерживались некоторое время при температуре 60° без напряжения, а затем у них измерялся ток

утечки и характер его спадания. Как видно из таблицы, конденсаторы, аноды которых отформованы без отдыхов, при испытании дали большой процент брака, в то время как конденсаторы, аноды которых отформованы с отдыхами, брака не дали и имели незначительный ток утечки.

Таблица 7

Тип конденсатора		Отформованы с отдыхами: 2 отдыха по 1 часу и 2 отдыха по 4 часа; всего 10 час.				Отформованы без отдыхов			
емкость, μF	рабочее напряжение, V	Ток утечки в mA после тепловых испытаний			% брака	Ток утечки в mA после тепловых испытаний			% брака
		при включении	через 15 сек.	через 30 сек.		при включении	через 15 сек.	через 30 сек.	
16	275	33,0	5,0	2,8	0	45	15	8	0
16	475	80	15	7	4	85	40	30	50
16	510	80	20	10	0	100	50	35	55
25	520	80	20	12	0	100	50	40	75

Благоприятное влияние отдыхов при формовке можно объяснить тем, что уже в процессе первичной формовки дается возможность оксидной пленке состариться и укрепиться до такой степени, что она становится мало чувствительной к растворяющему действию электролита.

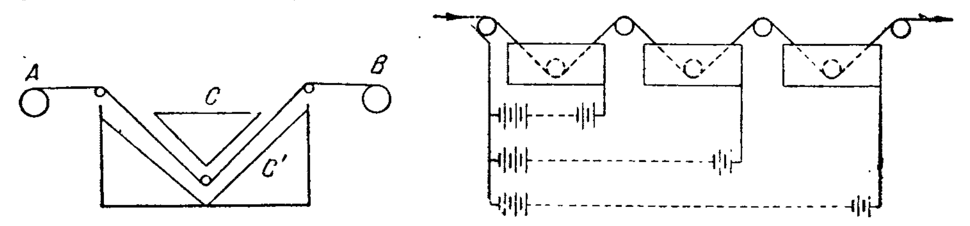
Таблица 8

№ формовочных электролитов	Время формовки в минутах до установления тока утечки	Ток утечки в mA при 490 V	Количество отдыхов
№ 1	110	2,5	2
	90	—	14
№ 2	77	3,5	2
	53	1,0	9
№ 3	280	6	1
	255	3	12

Интересно отметить, что отдыхи в первой и во второй стадиях формовки не увеличивают время формовки, как на первый взгляд казалось бы, а наоборот, сокращают это время, так как увеличивается скорость формовки. Из табл. 8 видно, что чем больше отдыхов, тем за более короткое время происходит формовка. Ток утечки у отформованных пластин также значительно ниже. Пластинки формовались до напряжения 500 V.

Динамическая формовка. На фиг. 26 представлена схематично ванна для динамической формовки. Алюминиевая фольга перематывается с рулона *A* на рулон *B*. На пути между *A* и *B* она проходит через формовочную ванну, где и подвергается формовке. Толстые

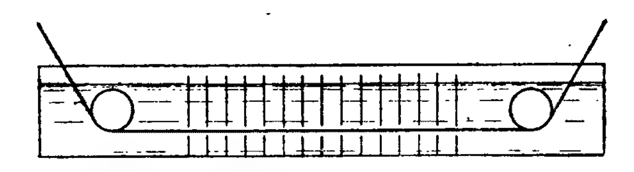
алюминиевые пластины C и C' прикреплены к корпусу ванны, к которому присоединен отрицательный полюс источника тока. Назначение пластин — обеспечивать равномерную формовку фольги с обеих сторон. Понятно, что формовка таким способом может происходить только при постоянном напряжении. Скорость протягивания устанавливается такой, чтобы фольга успела заформоваться при прохождении через ванну.



Фиг. 26. Схема динамической формовки.

Фиг. 27. Схема ступенчатой динамической формовки.

При формовке таким способом есть опасность, что при больших напряжениях у входа фольги в ванну будут получаться большие плотности тока, которые могут сжечь фольгу. Чтобы избежать этого, фольгу иногда, как показано на фиг. 27, пропускают последовательно через ряд ванн, из которых каждая последующая нагружена бо̀льшим напряжением. Такой способ формовки называется ступенчатым. Для регулирования требуемого напряжения на каждой ванне или пользуются несколькими генераторами, или, применив один источник тока, создают перепады напряжений при помощи реостатов.



Фиг. 28. Динамическая ванна с регулировкой плотности тока.

Применяют и другие способы динамической формовки, устраняющие опасность сгорания фольги в месте входа.

На фиг. 28 показана ванна с поперечными стенками с узкими прорезами, через которые проходит фольга. В этой ванне можно довести плотность тока у места входа до безопасной величины. Поперечные стенки должны делаться из непроводящего материала.

В процессе формовки в ванне образуется осадок гидроокиси алюминия, который, взмучиваясь, загрязняет электролит, что ухудшает формовку. Так как не всегда выгодно менять электролит, то иногда устраивают ванны с циркулирующим раствором. Во время циркуляции раствор, проходя через фильтр, очищается от осадка.

Формовку анодов для жидкостных («мокрых») электролитических конденсаторов можно производить только статическим способом. Это объясняется тем, что анодам жидких конденсаторов придается особая форма еще до образования на них оксидного слоя. Кроме того, статический способ удобен в том отношении, что позволяет изготовить более совершенную пленку, так как дает возможность изменять в любых пределах плотность тока, осуществлять отдыхи при формовке и т. п. Кроме того, при изготовлении небольших количеств конденсаторов расходы по устройству установок для статической формовки относительно невелики.

Метод динамической формовки, не имея этих преимуществ, обладает, однако, многими другими достоинствами, которые позволяют считать его лучшим методом, особенно при изготовлении больших количеств конденсаторов. К преимуществам этого метода относится, во-первых, быстрота формовки. Скорость формовки, как выяснено выше, почти пропорциональна плотности тока. В формовке статическим методом при постоянном напряжении, правда, тоже используется большая плотность тока, но, как уже выяснено выше, источник тока, не будучи все время нагружен полностью, используется нерационально, так как работает не на полной мощности.

При динамическом способе формовки этот недостаток устраняется тем, что большая плотность тока распространяется не на всю пластину сразу, а на маленький элемент фольги, входящей в ванну. Таким образом при небольшой силе тока, проходящего через ванну, можно формовать фольгу при очень больших плотностях тока. По подсчетам инж. Закгейма, при формовке в динамической ванне, при скорости протягивания фольги 0,5 *м/мин* при напряжении на ванне 525—530 V плотность тока при входе фольги в ванну составляет 190 mA/*см*^{2}. Обычно при формовке с постоянной плотностью тока последняя составляет 0,5—1 mA/*см*^{2}. Таким образом плотность тока повышена в 190 раз!

Второе преимущество динамического способа формовки заключается в том, что он требует малых производственных площадей и меньшего количества обслуживающих рабочих. Экономия тем больше, чем мощнее установка. Это обусловливается тем, что можно параллельно пропускать большое число лент фольги через одну ванну без значительного повышения расходов по уходу за ваннами.

Третьим преимуществом является более рациональное использование источника тока вследствие того, что при динамической формовке, во-первых, отпадают частые остановки для загрузки ванны фольгой, а во-вторых, сила тока и напряжение в процессе формовки остаются постоянными без какой-либо регулировки.

Наконец, при динамическом способе формовки качество оксидной пленки получается более однородным. Это дает возможность изготовлять конденсаторы одинаковых характеристик или, по крайней мере, без больших отклонений от номинала. При статических методах этого достичь трудно, так как каждая загрузка ванны дает несколько отличное качество заформовки пленки.

Влияние плотности тока на качество формовки. Выше уже было указано, что применение больших плотностей тока значительно ускоряет процесс формовки. При больших плотностях тока скорость формовки приблизительно пропорциональна плотности тока. Однако не всегда можно применять большие плотности тока, так как при них получается более крупнокристаллическая структура пленки, т. е. получается пленка более рыхлая и поэтому более подверженная расформовке в периоды бездействия конденсаторов. Происходит это потому, что пленка не успевает «стареть». Наоборот, при малых плотностях тока пленка получается мелкокристаллическая, более плотная и поэтому в дальнейшем более устойчивая против растворения. Качество пленки обычно сказывается на токах утечки конденсатора: чем хуже пленка, тем больше ток утечки. Исследования показывают, что аноды, заформованные при больших плотностях тока, в сухих конденсаторах дают малые токи утечки. Те же аноды в жидких конденсаторах дают токи утечки более высокие. Это, пожалуй, можно объяснить тем, что в сухих конденсаторах применяются неводные пастообразные электролиты, мало влияющие на растворение пленки. В жидкостных («мокрых») конденсаторах применяют водные электролиты, сильнее растворяющие пленку. Поэтому аноды для сухих конденсаторов формуют, главным образом, при постоянном напряжении, обычно динамическим способом, с большой плотностью тока. Аноды же для мокрых конденсаторов обычно формуют статическими методами, при постоянной плотности тока. При этом применяют плотности тока от 0,5—1 mA/*см*^{2}. Кроме того, как уже было указано, применением отдыхов в процессе формовки дают возможность укрепиться пленке настолько, что она в дальнейшем становится очень мало чувствительной к растворению в электролите.

Влияние температуры электролита формовочных ванн. В настоящее время формовку чаще всего ведут при высоких температурах (90—100°), т. е. вблизи точки кипения электролита. Реже ее ведут при более низких температурах. Это объясняется и чисто экономическими соображениями и удобством работы. Ток, проходя в процессе формовки через электролит, выделяет настолько много тепла, что электролит нагревается до точки кипения; отвод этого тепла был бы связан с удорожанием производства и усложнением формовочных ванн. Судя по некоторым данным, конденсаторы с пленкой, заформованной при высоких температурах, устойчивее работают при повышенных температурах. Токи утечки с повышением температуры таких конденсаторов мало увеличиваются. Это очень существенно, так как конденсаторы работают главным образом при повышенных температурах. Формовка же при более низких температурах имеет некоторые недостатки.

Например, часто наблюдается, что пленки, заформованные при низких температурах статическим методом, корродированы. Появление коррозии при низких температурах можно объяснить так. Выделяющийся из электролита растворенный воздух или выделяющийся при электролизе газ оседает на электродах, и в местах оседания пузырьков газа алюминиевая фольга не будет соприкасаться с элек-

тролитом. Это равносильно тому, что фольга не полностью погружена в электролит. А известно, что в таких случаях по линии раздела между электролитом и воздухом (линия раздела фаз), очевидно, в силу действия поверхностных сил алюминий будет растворяться сильнее, чем обычно, т. е. будет корродировать. Так как осевшие пузырьки газа создадут много мелких линий раздела фаз, то во многих местах алюминиевый анод покроется коррозионными пятнами, разрушающими анод и препятствующими его формовке.

При высоких температурах пузырьки газа, понятно, на электродах не оседают и поэтому коррозии не наблюдается. Правда, бывает, что при формовке изогнутых в гармошку анодов для жидкостных конденсаторов в углах изгиба (если грани гармошки сильно сближены), даже при высоких температурах могут задержаться пузырьки газа, вызывающие коррозию анода. Поэтому при формовке необходимо всякий раз следить за присутствием пузырьков газа на аноде и при их обнаружении немедленно удалять их встряхиванием анода.

Формовка переменным током. Формовку оксидной пленки для электролитических конденсаторов ведут преимущественно постоянным или пульсирующим (выпрямленным) током. Переменный ток для этих целей используют редко. Для получения же оксидной пленки, предназначенной для других целей, например для защиты от коррозии, декоративной, для изоляции проводов, для изготовления выпрямителей и т. п., переменный ток применяется часто.

Пленки, полученные при помощи переменного тока, имеют более низкое пробойное напряжение и, очевидно, более рыхлую структуру.

При формовке переменным током имеет значение частота его. При частотах от 50 до 500 Hz пленки получаются равномерные; при частотах 13 000 Hz и выше получить пленку уже невозможно.

При наложении переменного тока на постоянный качество пленки улучшается. Формовкой при наложении трехфазного переменного тока на постоянный удалось получить очень прочную твердую пленку.

Иногда применяют переменный ток для предварительной формовки анода, когда требуются небольшие напряжения и большие плотности тока, с тем чтобы потом эту пленку доформовать до высокого напряжения постоянным током.

Электролиты, применяемые для первичной формовки. Как на скорость формовки, так и на качество образуемой пленки большое влияние оказывает электролит, в котором производится формовка. Формовочные электролиты обычно представляют собой водные растворы кислородсодержащих кислот, их солей или смешанный раствор тех и других. Наиболее подходящими формовочными растворами считают растворы солей слабых кислот с сильным основанием. Так как при наличии сильного основания последнее может растворяюще действовать на пленку, то, чтобы замедлить это растворение, к раствору прибавляют достаточное количество свободной кислоты.

При составлении раствора необходимо обращать внимание на его pH. Наиболее хорошо идет формовка в электролитах, pH которых лежит между 4 и 6 (см. фиг. 24). Более кислые и более щелоч-

ные электролиты действуют растворяюще на пленку, замедляют скорость формовки и дают худшие по составу и прочности пленки. Чаще всего применяют формовочные электролиты с pH, близким к 6.

Для формовки можно использовать растворы сернокислого натрия, марганцевокислого калия, фосфорнокислого аммония, лимоннокислого аммония, лимонной кислоты, яблочной кислоты, двууглекислого аммония, кремнекислого натрия и т. п.

Такие электролиты, как растворы щавелевой, серной и хромовой кислот, комбинация серной кислоты с двухромовокислым калием, кислый виннокислый калий, сернокислый алюминий, образуют толстую пленку с высоким пробойным напряжением в сухом виде, но со значительным остаточным током в электролите.

Однако наиболее подходящими электролитами для формовки оказались растворы щелочных солей — борной, винной, лимонной, молибденовой, щавелевой кислот и их комбинации.

В настоящее же время в качестве формовочных наибольшее распространение получили два типа электролитов: водный раствор аммонийных или натриевых солей борной кислоты в смеси с борной кислотой и раствор серной кислоты.

Правда, применение *серной кислоты* в качестве формовочного электролита ограничено тем, что пленки, образованные в ее растворах, выдерживают только сравнительно низкие напряжения. Однако применение этого электролита имеет и свои выгоды. Поверхность алюминиевой фольги, подлежащей формовке, не всегда достаточно чиста и часто на ней остаются следы масла после прокатки. Не всегда целесообразно и возможно очищать фольгу от этих, часто незначительных, загрязнений. В то же время они могут затруднить формовку. Серная же кислота хорошо очищает поверхность фольги от этих масляных загрязнений.

Электропроводность этого электролита велика, что позволяет при сравнительно низких напряжениях иметь большую плотность тока, а следовательно, получать быстрое образование пленки. Благодаря этому раствор серной кислоты в качестве электролита часто употребляют при формовке переменным током.

Так как анодные пленки, образованные в электролите из серной кислоты, не выдерживают высокого напряжения, то формовка этим электролитом обычно применяется для предварительного образования пленки, с тем чтобы затем доформовать пленку другим электролитом до более высоких напряжений. В растворе серной кислоты можно заформовать пленку до напряжения 150 V.

Борат аммония — борная кислота. Растворы боратов аммония с примесью борной кислоты очень широко применяются в производстве электролитических конденсаторов. Этот тип электролита может применяться без изменения в концентрации при формовках анодов для напряжения от 10 до 550 V. В зависимости от комбинации количеств бората аммония и борной кислоты можно получить очень большие электропроводности этого электролита, что позволяет широко варьировать плотность тока.

Часто для приготовления такого электролита употребляют не смесь бората аммония с борной кислотой, а смесь борной кислоты с аммиаком. Результат, пожалуй, один и тот же, так как аммиак при смешении реагирует с борной кислотой, образуя бораты аммония. Недостатком такого смешения является только то, что неизвестно, какой из боратов получается. В настоящее время чаще всего употребляется тетраборат и пентаборат аммония. Есть основания полагать, что борно-аммониевые электролиты меняют свою концентрацию при высоких температурах вследствие улетучивания аммиака из раствора. Однако при всех прочих преимуществах этого электролита это не столь существенный недостаток, который к тому же можно легко устранять, добавляя аммиак в процессе работы ванны. В этом электролите получается плотная пленка с высоким пробивным напряжением.

В табл. 9 приведена рецептура борно-аммониевых и борно-аммиачных формовочных электролитов для разных напряжений формовки.

Таблица 9

Напряжение формовки, V	Дистиллированной воды, $см^3$	Борной кислоты, г	Пентабората аммония, г	Аммиака, г
500	100	16,2	0,148	—
—	100	15	0,13	—
500	100	10	0,2	—
500	100	20	0,2	—
600	100	5	—	0,8

Бура — борная кислота. Широко применяются электролиты, представляющие водные растворы буры в смеси с борной кислотой. Эти электролиты имеют то преимущество, что при использовании их нет потерь щелочей при высоких температурах. Есть также основание полагать, что анодная пленка, полученная при этом электролите, обладая той же прочностью, несколько тоньше, чем полученная с электролитами борно-аммониевыми. Кроме того, с этим электролитом можно получить более высокие напряжения формовки. Но при этом электролите благодаря концентрированию на катоде ионов натрия постепенно разъедаются образующейся щелочью формовочные алюминиевые ванны. Во избежание этого иногда применяют медные ванны.

Таблица 10

Формовочное напряжение, V	Дистиллированной воды, $см^3$	Борной кислоты, г	Буры, г
500—600	100	12	0,042
До 500	100	18	0,2
600	100	10	0,02
560	100	10	0,08
510	100	10	0,25
420	100	10	1,5
Ниже 400	100	10	2,5
460	100	3,25	0,745

Соотношение буры и борной кислоты в этом электролите не остается постоянным. Борная кислота постепенно частично испаряется, частично уносится алюминиевой фольгой, адсорбируясь

на ней, вследствие чего электролит постепенно делается более щелочным. Поэтому периодически требуется добавлять борную кислоту в процессе работы ванны.

В табл. 10 приведена сводка рецептов формовочных электролитов на буре и борной кислоте для различных формовочных напряжений.

Концентрация электролита и напряжение формовки. Выше уже было указано, что выгоднее вести формовку большими плотностями тока. При данном напряжении бо́льшую плотность тока можно получить, уменьшив сопротивление электролита, иначе говоря — увеличив его электропроводность. В таком случае сохраняется значительная мощность благодаря уменьшению падения напряжения в электролите. Увеличить электропроводность электролита можно увеличением его концентрации, вернее, повышением концентрации его легко диссоциирующей на ионы части.

Для электролитов, представляющих собой борно-аммониевые растворы или растворы борной кислоты и буры, в таком случае нужно увеличивать концентрацию бората аммония, аммиака или буры. Однако это сделать не всегда можно потому, что с повышением концентрации электролита уменьшается искровое напряжение на аноде (табл. 11).

Таблица 11

Концентрация борной кислоты, *г/л*	Концентрация аммиака, *г/л*	Искровое напряжение, V	Максимальное напряжение, V	Удельная электропроводность, обратные омы
120	8,4	365	400	0,0256
120	2,1	425	460	0,0080
120	0,5	460	485	0,00265
50	3,5	410	445	0,0154
50	0,85	445	480	0,00573
50	0,21	520	555	0,00121
15	1	440	485	0,00528
15	0,5	475	510	0,00331
15	0,12	575	600	0,000950
4	0,28	550	580	0,00122
4	0,07	660	690	0,00037
4	0,012	810	840	0,0000775

В табл. 11 представлены данные, характеризующие зависимость напряжения искрения и максимального напряжения на аноде, а также электропроводности раствора от соотношения концентраций борной кислоты и аммиака в электролите. Видно, что электропроводность и искровое, а также и максимальное напряжения, определяются главным образом концентрацией аммиака в электролите. Аналогичные данные получились бы, если бы вместо аммиака взять буру.

При формовке обычно стараются избежать искрения на аноде, так как при искрении получается неудовлетворительная пленка.

Поэтому для заданного напряжения формовки стараются подобрать такую концентрацию, чтобы искровое напряжение было близко к формовочному. При таком режиме максимально используется повышенная электропроводность электролита для увеличения плотности тока формовки.

Для анодов низковольтных конденсаторов это требование не вызывает никаких затруднений. Для них можно использовать наивысшую электропроводность употребляемого электролита, повышая концентрацию последнего. Для анодов же высоковольтных конденсаторов, с целью максимального использования электропроводности электролита, применяют ступенчатую формовку. Тогда в первой ванне, формуя при низком напряжении, употребляют сильно концентрированный электролит, а в каждой последующей ванне, с повышением напряжения, концентрацию электролита соответственно уменьшают. Варьируя концентрацию буры в электролите, содержащем буру и борную кислоту, можно таким методом образовать пленки, выдерживающие напряжение в 1000 V.

Уже из рассмотрения табл. 11 было видно, что необходимую электропроводность можно получить различным комбинированием концентрации борной кислоты и аммиака.

Однако установление оптимальной электропроводности еще не обеспечивает успеха формовки, ибо скорость формовки и качество заформованных анодов зависят в различной степени именно от концентрации компонентов.

Таблица 12

Состав формовочного электролита	Время формовки до тока утечки 0,025 А, минуты	Ток утечки при 490 V, mA
2% H_3BO_3+0,05% буры	165	5,0
2% H_3BO_3+0,2% буры	280 (до 0,05 А)	6,0
10% H_3BO_3+0,05% буры	80	1,8
10% H_3BO_3+0,2% буры	110	2,5
20% H_3BO_3+0,04% буры	70	1,0
20% H_3BO_3+0,2% буры	77	3,5

В табл. 12 приведены результаты исследования влияния концентрации борной кислоты и буры на скорость формовки и качество изготовленных конденсаторов по току утечки. Видно, что при увеличении концентрации борной кислоты увеличивается скорость формовки и улучшается качество полученного конденсатора. Наоборот, увеличение концентрации буры ухудшает процесс формовки и качество конденсатора. Аналогичные данные получаются и в том случае, если буру заменить боратом аммония.

Расчет формовочного напряжения. При установлении формовочного напряжения исходят из того, что при рабочем напряжении конденсатора ток утечки должен быть возможно малым. Так как при работе конденсатор может быть нагружен не только напряжением постоянного тока, но и некоторой долей переменного тока, то при формовке учитывают это обстоятельство.

Расчет формовочного напряжения производится по формуле:

$$U_{ф} = U_{р} + 1,4\,U_{\sim}, \qquad (30)$$

где $U_{ф}$ — формовочное напряжение; $U_{р}$ — рабочее напряжение постоянного тока; $U_{\sim}$ — составляющая напряжения переменного тока.

В случае, если конденсатор не будет иметь составляющей переменного напряжения, формовочное напряжение берется на 10—15% выше рабочего. Исключение составляют регулирующие конденсаторы, у которых рабочее напряжение почти совпадает с формовочным, лишь незначительно превышая его. Причина этого будет объяснена ниже.

Таблица 13

Рабочее напряжение, V	Формовочное напряжение, V	Рабочее напряжение, V	Формовочное напряжение, V
25	35	275	325
50	75	300	350
75	100	325	375
100	150	350	425
125	175	375	450
150	200	400	475
175	225	425	500
200	275	475	550
225	275	475	550
250	300	500	600

Отношение формовочного напряжения к рабочему для сухих конденсаторов представлено в табл. 13, из которой видно, что чем ниже рабочее напряжение, тем на относительно бо́льшую величину превышает его формовочное напряжение.

Так, например, конденсатор с рабочим напряжением 475 V имеет формовочное напряжение 550 V, т. е. приблизительно на 16% превышающее рабочее. Конденсатор на 50 V рабочего напряжения имеет формовочное напряжение на 50% выше, т. е. 75 V.

Таблица 14

Рабочее напряжение, V	Пиковое напряжение, V	Формовочное напряжение, V
450	500	560
350	400	450
250	300	375
150	170	185
100	120	130
40	50	60
30	50	60
18	22	24
15	20	22
12	15	18

Иногда для расчетов пользуются не рабочим напряжением, а пиковым, т. е. тем напряжением, которое гарантируется как максимальное, которое еще можно допускать на конденсаторе.

Некоторые американские и английские фирмы считают, что для высоковольтных конденсаторов формовочное напряжение должно быть, примерно, на 5% выше пикового, а для низковольтных конденсаторов на 10% выше пикового.

Отношение формовочного напряжения к рабочему и пиковому для конденсаторов, изготовляемых в СССР, приведено в табл. 14, из которой видно, что у нас как для высоковольтных, так и для низковольтных конденсаторов формовочное напряжение превышает пиковое почти на одинаковую величину — от 10 до 20%.

Контроль. Для того чтобы обеспечить правильное ведение процесса производства, необходим его контроль. В процессе первичной формовки производятся следующие контрольные операции:

1) контроль чистоты воды,
2) контроль концентрации электролита,
3) контроль pH электролита,
4) контроль присутствия вредных примесей в электролите,
5) контроль качества формовки.

Производство электролитических конденсаторов требует весьма чистых материалов и соблюдения самой строгой чистоты в производственных помещениях. Достаточно указать, что рабочий на первичной формовке должен работать в резиновых перчатках (хирургических), чтобы не загрязнить пленку жировыми выделениями (потом) рук. Самые незначительные загрязнения сказываются на процессе формовки.

О чистоте материалов и влиянии загрязнений будет подробно сказано в следующей главе, здесь же этот вопрос затрагивается только в связи с контролем процессов первичной формовки.

Контроль чистоты дистиллированной воды ведется обычно по ее удельному сопротивлению. Чем грязнее вода, т. е. чем больше в ней примесей, кислот или щелочей, тем меньшим удельным сопротивлением она будет обладать. Наоборот, чем вода чище, тем ее удельное сопротивление выше. Не всякие примеси в воде мешают формовке. Однако, так как химический анализ очень малых концентраций загрязняющих примесей связан с большими трудностями, а при очистке воды путем дестилляции все равно удаляются в равной мере и другие примеси, то контроль чистоты воды производится по удельному сопротивлению ее, определение которого не представляет никаких затруднений.

Чистая дестиллированная вода имеет удельное сопротивление $2{,}5 \cdot 10^7\ \Omega/см^3$. Вполне пригодная вода для составления формовочного электролита должна иметь удельное сопротивление 250 000—300 000 $\Omega/см^3$. Удельное сопротивление измеряется или мостом Кольрауша на переменном токе или, пользуясь схемой вольтметра-амперметра, на постоянном токе. Конечно, измерение мостом точнее, но в условиях производства производственный шум мешает слушать телефон. Поэтому чаще измеряют удельное сопротивление воды при помощи схемы вольтметра-амперметра.

При измерении этим методом появляются ошибки вследствие поляризации электродов. Если электроды состоят из платины, то потенциал поляризации составляет 1,67 V. Во избежание ошибки на поляризацию необходимо применять достаточно большое напряжение, соответственно раздвинув электроды, чтобы не вызвать больших токов. При напряжении 100 V ошибка на поляризацию будет составлять 1,6%.

Концентрация электролита и вредные примеси в нем устанавливаются химическим анализом в химической лаборатории или дежурным химиком в цехе. Анализ электролита на загрязнения производится сейчас же, как только раствор составлен, перед пуском

ванны в работу. В случае обнаружения загрязнений электролит заменяют. В дальнейшем всякий раз перед каждой формовкой производят анализ для определения загрязнения хлором и сульфатами.

Анализ с целью установления *концентрации составных частей электролита* достаточно производить при трехсменной работе один раз в сутки, а при односменной работе — один раз в три дня. Анализом устанавливается, какое количество и каких химикатов нужно добавить в раствор.

pH *раствора* контролируют обычно в цехе колориметрическим методом при помощи ряда Михаэлиса.

Контроль качества пленки. Качество пленки контролируется по цвету пластины. В зависимости от толщины пленка имеет различную интерференционную окраску: голубую, желто-зеленую, фиолетово-синюю, красно-фиолетовую и т. п. При известном навыке контролер всегда может отличить достаточно хорошо заформованную фольгу. Наличие коррозийных пятен часто определяют, рассматривая пленку в лупу. Конечно, это сугубо субъективный метод, на который нельзя положиться.

Объективный метод состоит в том, что заформованную пластинку испытывают на ток утечки и на емкость. Для этой цели применяется небольшая алюминиевая ванночка, заполненная определенным электролитом. В ванночку подвешивают испытываемую пластинку и подключают сначала к источнику прямого тока (обычно к кенотрону) для измерения тока утечки, а затем к мостиковой установке для измерения емкости. Корпус ванночки в этом случае является одним из полюсов конденсатора, а вторым полюсом служит испытуемая заформованная фольга.

3. РАБОЧИЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ И РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ КОНДЕНСАТОРОВ

Электролитический конденсатор состоит из диэлектрика — оксидной пленки, отформованной на анодной пластине конденсатора, и обкладок, которыми служат с одной стороны сама анодная пластинка, а с другой—электролит. Катодная алюминиевая пластина выполняет только роль контакта между электролитом и источником электрического тока.

На первый взгляд казалось бы, что можно обойтись без электролита, приложив прямо к оксидированной пластине неоксидированную. В этом случае мы также будем иметь систему, состоящую из диэлектрика и двух обкладок, т. е. конденсатор. Однако так конденсаторы не изготовляются, так как, во-первых, как уже было выяснено, при соприкосновении с металлом оксидная пленка легко пробивается, и во-вторых, если бы и можно было избежать пробоя для конденсаторов при низком напряжении, все же такая конструкция не годилась бы, так как металлическая фольга не может прилечь во всех точках диэлектрика так плотно, как электролит. Всегда останутся воздушные прослойки как между обкладкой и диэлектриком, так и в порах самого диэлектрика. При этом мы получим обычный воздушный конденсатор и не используем всех преимуществ оксидной пленки.

Таким образом электролит является неотъемлемой и очень существенной частью электролитического конденсатора и, как будет выяснено ниже, его присутствие обусловливает во многом специфические особенности этого типа конденсаторов. Его роль сводится не только к выполнению функций обкладки; он также выполняет роль формовочного электролита, все время подформовывающего в процессе работы диэлектрическую пленку конденсатора.

В отличие от электролита, употребляемого для формовки диэлектрика, электролит, применяемый в конденсаторе, называется рабочим электролитом. В практике изготовления электролитических конденсаторов было испробовано и применяется сейчас очень много различных составов рабочих электролитов, однако все они могут быть сведены в небольшое количество групп, объединяющих электролиты, сходные по составу.

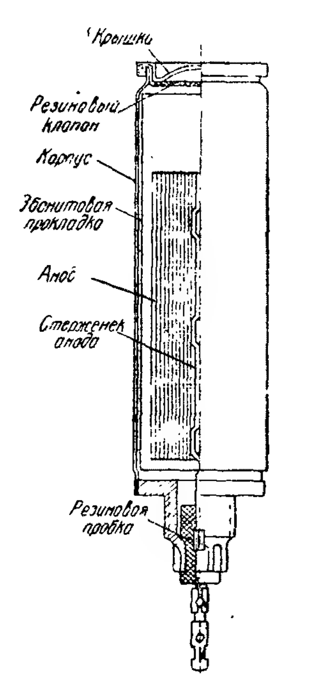
Имеется два основных вида рабочих электролитов, отличающихся между собой по составу растворителя: водные и неводные электролиты. Неводные электролиты в свою очередь делятся по способу приготовления на сухие и полусухие электролиты.

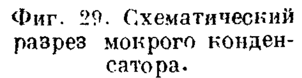
В зависимости от применения в конденсаторах электролита того или иного вида конденсаторы различаются по своей конструкции и по своим электрическим свойствам. Поэтому конденсаторы также делятся на три типа — сухие, полусухие и жидкостные (или, как их еще называют, «мокрые») электролитические конденсаторы.

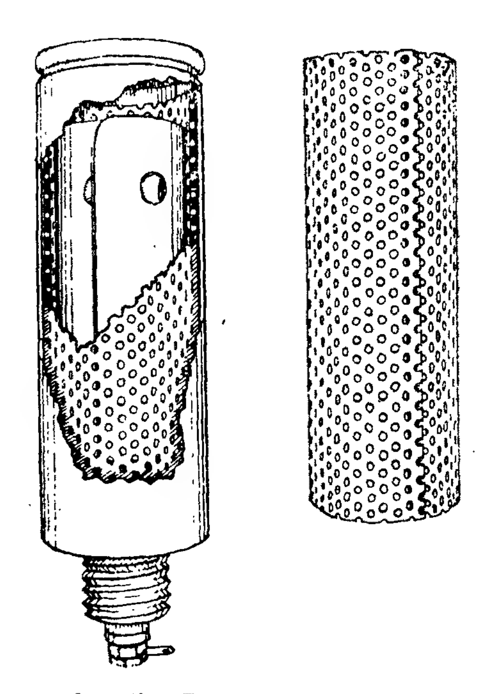
Жидкостные (мокрые) конденсаторы. Водные электролиты. Жидкостный конденсатор — это наиболее простой тип электролитического конденсатора. Схематический чертеж его дан на фиг. 29, а внутренний вид—на фиг. 30. По своему устройству конденсатор представляет алюминиевый сосуд (корпус), наполненный водным электролитом, в который погружается согнутая (в гармошку или иную форму), покрытая оксидным слоем алюминиевая пластинка (анод), поддерживаемая в центре корпуса алюминиевым стержнем (держателем анода). Держатель анода через резиновую пробку выходит наружу корпуса, где он служит выводным контактом анодной обкладки конденсатора. Катодным выводом конденсатора служит сам корпус, так как он электрически соединен с электролитом. Во избежание соприкосновения анода с корпусом между ними помещается перфорированная эбонитовая прокладка. Сверху корпуса помещается резиновый клапан, прикрытый алюминиевым колпачком. В простейшем случае он представляет собой резиновый кружок, проколотый иглой. Более сложный вид клапана показан на фиг. 31. В простейшем виде при завальцовке (укреплении) колпачка резиновый кружок натягивается, и со временем, благодаря деформации резины, может в месте прокола образоваться незатягивающееся отверстие. Конструкция, показанная на фиг. 31, не имеет этого недостатка, так как резиновый кружок не растягивается.

Назначение клапана следующее. При работе конденсатора совершается обычный процесс электролиза, в результате чего выделяются кислород и водород. При наличии клапана эти газы могут выйти наружу; в противном случае их могло бы скопиться столько,

что они могли бы взорвать конденсатор. По этой же причине жидкостные конденсаторы должны монтироваться только анодным вы-

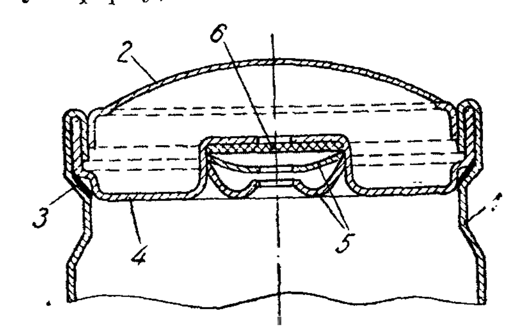



Фиг. 29. Схематический разрез мокрого конденсатора.


Фиг. 30. Внутренний вид мокрого конденсатора.

водом вниз, так как иначе газы будут давить на жидкость, и электролит будет вытекать через клапан.

Придавая аноду ту или иную форму, заботятся о том, чтобы в пределах данного размера корпуса иметь возможно бо́льшую анодную поверхность, и, кроме того, стремятся уменьшить путь прохождения ионов через электролит. От длины этого пути зависят, главным образом, потери в электролитических конденсаторах. Многие измерения показали, что наиболее короткий путь для ионов получается в том случае, когда анод изготовлен в форме гармошки. Наибольшую же поверхность можно поместить, если изготовленный в виде гармошки анод обертывается

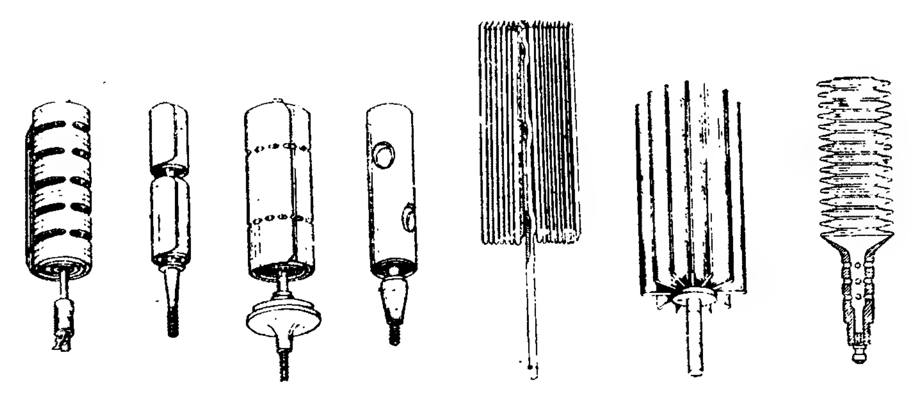


Фиг. 31. Конструкция клапана:

1—корпус, 2—крышка, 3—резиновая прокладка, 4—основание клапана, 5—шайба, 6—клапан (резиновый кружок).

вокруг держателя спиралью в виде часовой пружины. На фиг. 32 показаны различные типы анодов, которых, вообще говоря, очень много.

Фольга, идущая на спиралеобразные и звездообразные аноды, предварительно перфорируется. Перфорирование заключается в том, что в фольге пробиваются отверстия. Общая площадь отверстий иногда доходит до 50% всей площади анода, обычно же она составляет 10—15% ее. Отверстия делаются для того, чтобы предоставить движению ионов наиболее короткие пути ко всем точкам поверхности анода, так как это уменьшает потери энергии в конденсаторе.



Фиг. 32. Типы анодов.

В зависимости от формы анода применяют алюминиевую фольгу различной жесткости и толщины. В случае гармошки, например, применяют более тонкую — от 0,08 до 0,1 *мм* и мягкую фольгу; в случае спирали—более толстую (0,15 *мм*) и твердую. Анод приклепывается к стержню алюминиевой заклепкой или зажимается в разрезе стержня.

Собирают аноды для жидкостных конденсаторов из сырой, еще не отформованной фольги. После того как анод собран, его химически очищают (методы очистки см. ниже) от загрязнений, главным образом жировых, попавших на фольгу и держатель анода при сборке, и подвергают формовке. Отформованный и промытый анод помещают затем в корпус конденсатора.

После того как собранный анод укреплен в корпусе, в котором заранее помещена изолирующая прокладка, конденсатор заливают рабочим электролитом. Сверх корпуса вставляют клапан, накрывают корпус крышкой и конденсатор поступает на тренировку.

В корпус вливают столько электролита, чтобы анод был погружен в него полностью. Обычно уровень электролита должен превышать уровень анода на 0,5—0,8 *см*. Неполностью покрытый электролитом анод, понятно, покажет неполную свою емкость. К тому же на грани раздела анода, электролита и воздуха в силу поверхностных явлений возникнет коррозия анода. Между клапаном и уровнем электролита оставляется незаполненное пространство высотой около

20 *мм* на случай расширения электролита при нагревании или замораживании.

Рабочими электролитами обычно служат водные растворы борной кислоты с некоторой добавкой или бората аммония, или аммиака, или буры соответствующей концентрации. Электролит должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Иметь возможно малое удельное сопротивление с целью уменьшить потери энергии в конденсаторе.

2. Представлять собой слабокислую среду, т. е. иметь pH 5 ÷ 6, так как слабокислые электролиты оказыват очень малое растворяющее действие на окисную пленку алюминия (почти не растворяют ее), что, в свою очередь, позволяет иметь наиболее устойчивые электрические характеристики конденсатора.

3. Искровое напряжение электролита должно лежать выше напряжения, которое нормируется для конденсатора, как напряжение перегрузки.

Таблица 15

Рабочее напряжение, V	Концентрация компонентов электролита, %				Удельное сопротивление, Ω	pH
	H_3BO_3	$(NH_4)_2B_{10}O_{16}$	NH_3	$Na_2B_4O_7$		
До 420	5	2,4	—	—	95	—
» 455	5	0,84	—	—	242	5,3
» 480	5	0,46	—	—	422	5,2
» 505	5	0,34	—	—	558	—
» 450	5	—	0,05	—	250	5,5
» 450	3,25	—	—	0,74	—	—
до 300	12	—	4,5	—	62	6
до 300	10,2	—	8,25	—	—	—
до 300	3	6	—	—	—	6,4
до 300	0	11	—	—	—	6,9

В табл. 15 приведены некоторые рабочие электролиты для жидкостных конденсаторов. Сопоставление первых четырех электролитов, содержащих одну и ту же концентрацию борной кислоты, показывает, что удельное сопротивление и pH электролита регулируется концентрацией бората аммония.

Аналогично поступают и в том случае, если вместо бората аммония в качестве дополнительного компонента взят аммиак или бура, т. е. при данной концентрации борной кислоты удельное сопротивление и pH рабочего электролита регулируются концентрацией этих компонентов.

Таким образом концентрация бората аммония, буры или аммиака в рабочем электролите зависит от того, для какого рабочего напряжения изготовляется конденсатор. Чем выше рабочее напряжение, тем, очевидно, ниже должна быть концентрация этих компонентов, и наоборот.

Что же касается концентрации борной кислоты, то её берут такой, чтобы создать слабокислую среду. Борная кислота сама по себе является кислотой слабой, поэтому стараются ее концентрацию сделать по возможности большей; но так как при 5% ее содержания она при комнатной температуре дает насыщенный раствор и, следовательно, дальнейшее ее прибавление уже не имеет смысла, то обычно ограничиваются этой концентрацией. Так приготовляют раствор в том случае, когда в качестве дополнительного компонента в раствор добавляется соль борной кислоты — борат аммония или бура. Если же добавляется аммиак, то концентрация борной кислоты берется несколько выше, в силу того, что часть кислоты расходуется на реакцию с аммиаком и на образование боратов аммóния.

В последнее время стали изготовлять так называемые регулирующие конденсаторы, описанные ниже. Это те же жидкостные конденсаторы, но несколько отличающиеся по составу рабочего электролита. Состав рабочего электролита у них тот же, что и у обычных конденсаторов, но характеризуется еще меньшей кислотностью среды, иногда доходя до слабощелочной и лежит в пределах pH $= 6 \div 7$. Некоторые данные о составе этих электролитов приведены в табл. 15 для напряжений 300 V.

Изучение электролитов, составленных на буре, борате аммония и аммиаке, показывает, что наиболее устойчивые характеристики конденсаторов получаются в случае применения борато-аммониевых электролитов; электролиты же с бурой дают конденсаторы с менее устойчивыми характеристиками.

Жидкостные электролитические конденсаторы могут работать при температурах 0—+65°. При более низкой температуре они не могут работать потому, что электролит замерзает и теряет проводимость. Для понижения точки замерзания электролита в него вводят этиленгликоль. Это дает возможность расширить температурный диапазон работы жидкостных конденсаторов до —20° или —30°.

Примерные составы рабочих электролитов с этиленгликолем для различных напряжений приводятся в табл. 16.

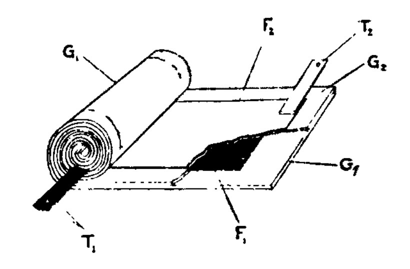
Таблица 16

Рабочее напряжение, V	Содержание воды, %	Содержание этиленгликоля, %	Содержание борной кислоты, %	Содержание борат-аммония %
500	80	20	5	0,4
455	80	20	5	1,7
420	80	20	5	3,0

Сухие конденсаторы. Пастообразные электролиты. Электролитические конденсаторы, рабочие электролиты которых представляют собой растворы пастообразной, почти твердой, консистенции, называют сухими конденсаторами. По конструкции они сильно отли-

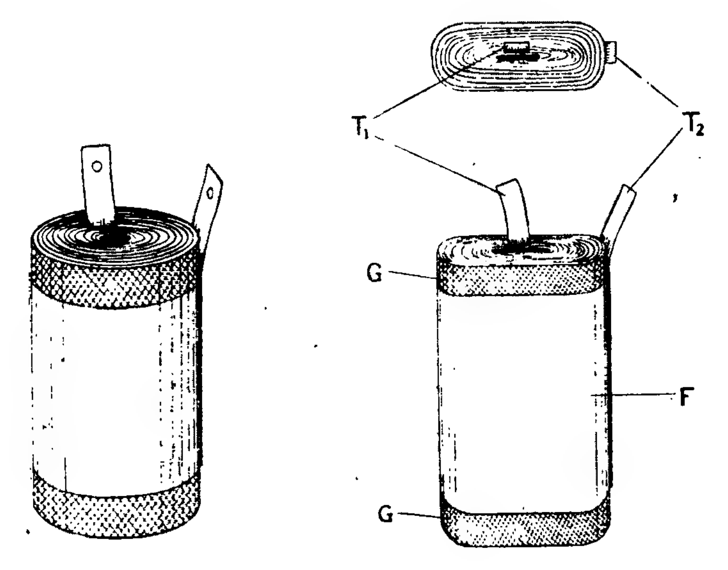
чаются от жидкостных электролитических конденсаторов и скорее напоминают конструкцию бумажных конденсаторов.

В общих чертах сборка сухого конденсатора (фиг. 33) производится следующим образом: на полоску бумаги G_1, пропитанную рабочим электролитом, накладывается тонкая неоксидированная алюминиевая фольга F_1 — катод конденсатора. Сверху этой фольги накладывается вторая полоска пропитанной электролитом бумаги G_2, а на нее уже накладывается оксидированная алюминиевая фольга F_2 — анод конденсатора. К катодной и анодной фольге приклепываются узкие полоски в первом случае неоксидированной T_1, а во втором—оксидированной T_2 алюминиевой фольги — выводные контакты обкладок.



Фиг. 33. Скатка секции сухого конденсатора.

В месте, где выводы обкладок выступают из электролита (т. е. бумаги, пропитанной электролитом), они или обвертываются плотно изоляционной материей, или покрываются изоляционным лаком.

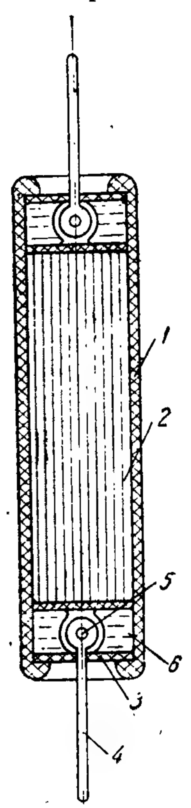


Фиг. 34. Секции сухих конденсаторов.

Это делается с целью избежать коррозии выводов на границе алюминий — электролит — воздух. Затем все это скатывается в форму, как показано на фиг. 34, и в таком виде называется конденсаторной секцией.

В готовом виде секция обвертывается в провощенную или в пропарафинированную бумагу и вставляется в корпус. В зависимости от требований корпусы могут быть металлическими или из плотной бумаги. Форма их может быть различна.

Когда секция скатана и обвернута в провощенную бумагу, к алюминиевым полоскам-выводам приклепывают гибкие или жесткие проводники — наружные выводы обкладок конденсатора. Если корпус конденсатора бумажный, то делается два наружных вывода (фиг. 35); на корпусе в этом случае около вывода анода помечается плюс (+) и около вывода катода минус (—). Это необходимо для того, чтобы при употреблении конденсатора не спутать полюсы, так как электролитические конденсаторы полярны.



Фиг. 35. Конденсатор в бумажном корпусе:

1—корпус, 2—секция, 3—панелька, 4—вывод, 5—склейка вывода, 6—битум.

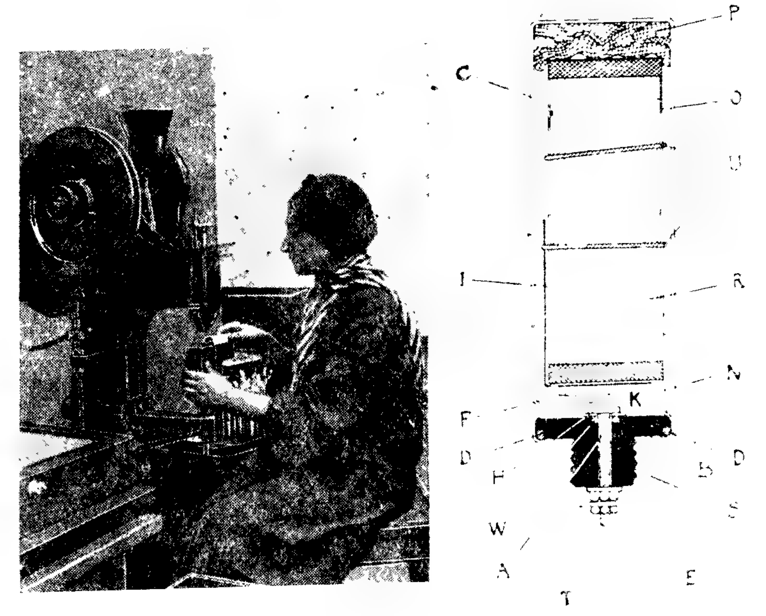
Если корпус металлический (чаще всего алюминиевый), то часто катодный вывод прижимают к корпусу, и последний служит, как и у жидкостного конденсатора, отрицательным полюсом.

Анодный положительный вывод конденсаторной секции, как показано на фиг. 36, через изолирующую эбонитовую или гетинаксовую панельку приклепывается к наружному контактному лепестку, после чего панелька завальцовывается в корпусе. Другой способ укупорки секции в корпусе и конструкция крепления выводов показана на фиг. 37. Соответствующими буквами обозначены следующие детали: *C* — алюминиевый корпус, *O* — секция. *P* — мягкая бумажная прокладка, положенная с той целью, чтобы секция не болталась в корпусе и не оборвала бы выводов обкладок; *I* — изоляция из провощенной плотной бумаги, изолирующая анодный вывод *F* от корпуса и катодного вывода *N*. При завальцовке в корпусе втулки *B* между корпусом и втулкой прокладывается резиновое кольцо *D* для герметизации. Винтовая нарезка *S* на втулке сделана для удобства крепления конденсатора к шасси приемника. Анодный вывод приклепывается к алюминиевому стержню *A*, который гайкой *E* плотно прижимается к втулке и служит наружным анодным выводом конденсатора. Чтобы при монтаже иметь возможность припаять к анодному выводу проводники, на нем еще помещается контактный лепесток *T* из латуни или стали, покрытый легко паяющимся металлом: серебром, кадмием, оловом и т. п. Пространство *K* обычно заливается парафином, воском, битумом или другим подходящим материалом.

Готовые конденсаторы показаны на фиг. 38.

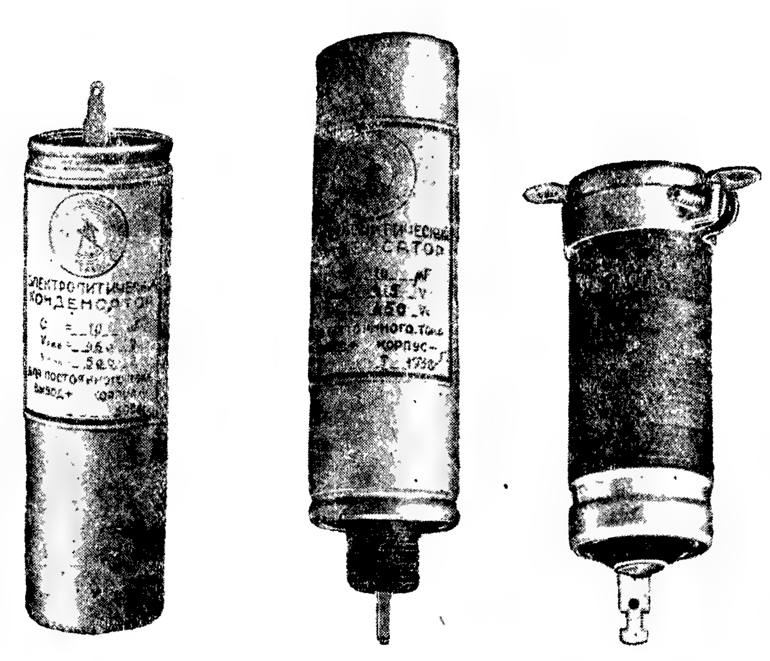
Пропитка конденсаторных секций. Сборка секций (намотка) производится или полностью вручную, как показано на фиг. 39, или механически при помощи намоточных станков (фиг. 50).

Бумажная прокладка выполняет роль носителя электролита, поэтому она должна обладать большой впитывающей способностью.



Фиг. 36. Приклепка анодного вывода к контактному лепестку.

Фиг. 37. Внутренний вид сухого конденсатора.



Фиг. 38. Готовые конденсаторы.

Иногда вместо бумаги употребляют плотную марлю, а иногда и то и другое вместе. При ручном способе сборки секций бумагу пропитывают рабочим электролитом обычно заранее. При механической закатке бумагу пропитывают или в момент скатки, когда бумага и фольга, как это видно на фиг. 40, протягиваются через сосуд с электролитом, или после скатки, в уже готовой секции. В готовом виде секцию пропитывают при помощи центрофуги или под вакуумом.



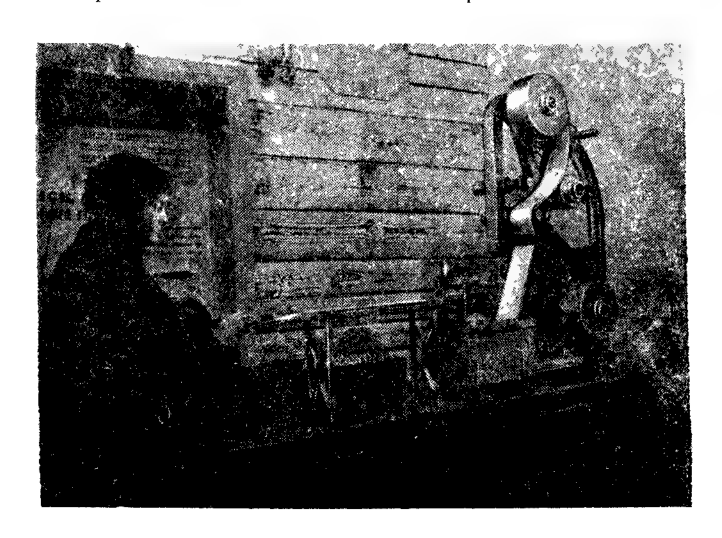
Фиг. 39. Ручная скатка секций.

Пропитка центрофугированием производится следующим образом. В барабан, разделенный внутри на несколько секций, вставляют торцами к центру конденсаторные секции. Затем бак заливают электролитом, закрывают и приводят во вращение от мотора со скоростью 1000—1200 об/мин. Развиваемая при этом центробежная сила вгоняет электролит в конденсаторную секцию и пропитывает бумагу.

Пропитку под вакуумом производят следующим образом. В герметически закрывающийся бак загружают электролит и конденсаторные секции, причем секции должны быть погружены в электролит. После этого бак закрывают и из него вакуумным насосом отсасывают воздух. Вследствие создавшегося разрежения воздух из капилляров бумаги и секции уходит и его место заполняет электролит. Степень разрежения подбирают такую, чтобы, с одной стороны, электролит не испарялся сильно и вместе с тем чтобы обеспечивалась достаточно быстрая пропитка секций. Исходя из этих соображений, величина вакуума обычно поддерживается не больше 50—45 *см* рт. ст. При этом время пропитки составляет от 45—60 мин. (для маленьких секций) до 2 час. (для больших секций).

Температуру электролита при пропитке поддерживают по возможности высокой с целью уменьшить его вязкость и тем самым улуч-

лить и ускорить пропитку. При комнатной температуре электролиты очень вязки (пастообразны), иногда даже тверды и хорошо пропитать секции ими невозможно. Однако верхние пределы температур электролита при пропитке ограничены. Во-первых, температура электролита при пропитке не должна быть выше температуры его варки. В противном случае изменились бы его физико-химические свойства, что повлекло бы за собой изменение свойств конденсаторов. Во-вторых, при пропитке в вакууме слишком высокая температура вызывала бы интенсивное испарение электролита, что повлекло бы за собой быстрое изменение его концентрации.



Фиг. 40. Механическая скатка секций.

При ручной пропитке бумаги существует опасность ожогов рук рабочего-закатчика секций. Поэтому температуру электролита при ручной пропитке поддерживают обычно в пределах 60—70°, а при механической пропитке 100—115°.

Для проверки качества пропитки готовых секций из каждой пропитываемой партии разматывают две-три секции и подвергают их осмотру. Пропитка бумаги перед скаткой и во время скатки путем протяжки через электролит, несомненно, дает лучшее качество по сравнению с методом центрофугирования и пропитки под вакуумом. При пропитке готовых секций, благодаря тому, что скорость впитывания составных частей электролита различна, можно получить различную консистенцию пасты у краев и на середине секции. Поэтому при этих методах пропитки трудно получить одинаковые характеристики конденсаторов различных партий.

Кроме того, при пропитке под вакуумом электролит в пропиточном баке со временем изменяет свою консистенцию, потому что более подвижная и более летучая часть электролита (в частности вода) быстрее расходуется. Уже после двух-трех пропиток в одном и том же электролите в нем выпадает значительное количество твер-

дого осадка (кристаллы борной кислоты), электролит становится более вязким, следовательно, плохо пропитывает бумагу, отчего получаются конденсаторы с большим коэфициентом мощности.

Поэтому в одном и том же электролите обычно производится не больше трех пропиток, после чего электролит подлежит восстановлению. Восстановление электролита заключается в том, что к старому электролиту добавляют недостающие компоненты — воду, этиленгликоль или глицерин, иногда борную кислоту и аммиак, и доводят электролит до температуры, при которой он был изготовлен. Количество добавляемых компонентов устанавливается экспериментально.



Фиг. 41. Заливка конденсаторных секций битумом.

В некоторых случаях перед тем, как завертывать пропитанные секции в провощенную бумагу и укупоривать в корпуса, их подвергают часовому прогреванию в термостатах при температуре 65—75°. Прогрев производится с целью дать возможность электролиту более равномерно распределиться в секции и удалить с поверхности секции излишки влаги, которая могла тем или иным способом попасть туда. Наличие же излишка влаги приводит к понижению в местах ее присутствия искрового напряжения и к коррозии алюминиевой фольги, особенно анодов. Поэтому защита секции от влаги имеет очень большое значение.

Защита секций от внешней влаги. Для защиты от внешней влаги конденсаторные секции обвертывают в бумагу, пропитанную воском, парафином или другим влагоизолирующим материалом; торцы секции также закрывают этой бумагой. После этого секцию окунают в расплавленный воск или парафин. Помещенную в корпус секцию заливают воском или специальным битумом. На фиг. 41 показан процесс заливки конденсаторных секций, собранных в корпуса.

Бумажные корпуса перед помещением в них секций пропитывают воском или парафином при температуре 130—160°.

Нормировка конденсаторной секции. Нормировка конденсаторной секции сводится к определению правильных размеров анодной и катодной фольги и бумажной или марлевой прокладки, отвечающих рабочему напряжению, емкости и геометрическим размерам (габаритам) готового конденсатора.

Зная для анодной фольги, отформованной под заданное рабочее напряжение, удельную емкость, которую определяют подсчетом по формуле (25), исходя из формовочного напряжения, или выборочным измерением емкости образцов отформованной фольги, и зная ширину фольги, которая определяется высотой конденсатора, подсчитывают длину фольги. Если обозначить ширину фольги в *см* через b, емкость конденсатора — через C и удельную емкость анодной фольги через c, то, учитывая, что заформованы обе фольги, длину l анодной фольги в *см* можно подсчитать по формуле:

$$l = \frac{C}{2c'b}. \qquad (31)$$

Значение емкости обычно берут на 15—20% выше установленного номинала, так как из-за недостаточно хорошего контакта фольги с электролитом или из-за повышенной вязкости электролита емкость готового конденсатора может быть ниже расчетной.

П. М. Дилей для вычисления размера анода для низковольтных конденсаторов рекомендует пользоваться следующей формулой:

$$l = \frac{0{,}0024 U_ф C}{b}, \qquad (32)$$

где $U_ф$ — напряжение, при котором заформована анодная фольга, 0,0024 — постоянная, C — емкость конденсатора в микрофарадах, l и b — соответственно длина и ширина анодной фольги в *см*.

В табл. 17 приведена величина поверхности анодной фольги, необходимая для емкости в одну микрофараду в зависимости от напряжения, при котором эта фольга заформована.

Таблица 17

Напряжение формовки, V	Анодная поверхность, $см^2/\mu F$
100	12,5
150	18,75
200	25
250	31,25
300	37,5
350	43,75
400	50,0
450	56,25
500	62,5
550	68,75
600	75,0

Ширина катодной фольги должна быть равна ширине анодной фольги, длина же ее берется несколько больше, с расчетом, чтобы после скатки секции можно было ее обернуть 1—1½ раза катодной фольгой.

Бумажная или марлевая прокладка между анодом и катодом выполняет не только роль носителя электролита. Она также предохраняет анод и катод от соприкосновения, которое вызвало бы короткое замыкание конденсатора. Поэтому ширину прокладки берут примерно на 1 *см* больше ширины анодной и катодной фольги. Длина же прокладки должна

Таблица 18

Пиковое напряжение конденсатора, V	Число слоев бумаги	Толщина каждого слоя бумаги, *см*
До 75	1	0,005
От 75 до 250	1	0,0075
» 250 » 425	1	0,010
» 425 » 475	2	0,01 + 0,0025
» 475 » 550	2	0,0075
» 550 » 600	2	0,010

быть меньше длины катодной и больше длины анодной фольги настолько, чтобы при скатке секции фольги не соприкасались.

Толщина прокладки определяется рабочим напряжением конденсатора: чем выше рабочее напряжение, тем толще прокладка. В табл. 18 приведены нормы для толщины прокладки, принятые одной из американских фирм, в зависимости от пикового напряжения конденсатора.

Рабочие электролиты. Рабочие электролиты для сухих электролитических конденсаторов, как уже было указано, представляют собой главным образом растворы борной кислоты с добавкой аммиака или бората аммония в глицерине, этиленгликоле или в смеси глицерина, сахара и воды.

Электролит приготовляют следующим образом. В алюминиевый сосуд вливают нужное количество растворителя — глицерина или этиленгликоля, добавляют соответствующее количество борной кислоты и бората аммония или водного раствора аммиака, смесь тщательно перемешивают и нагревают до необходимой температуры. Эту температуру в практике изготовления электролитических конденсаторов называют температурой варки электролита.

После этого электролит готов к употреблению.

Иногда вместо водного раствора аммиака употребляют сухой газообразный аммиак. В таком случае после добавления к растворителю борной кислоты параллельно с подогреванием раствора через него пропускают газообразный аммиак до тех пор, пока pH раствора достигнет желаемого значения. Величина pH электролита для сухих конденсаторов обычно лежит в пределах 5—5,5 единиц.

При выборе концентрации и соотношения компонентов, входящих в электролит, исходят из необходимости для электролита иметь как можно меньшее удельное сопротивление, достаточно высокое (для предохранения при пиковом напряжении конденсатора) искровое напряжение и пастообразную консистенцию после остывания.

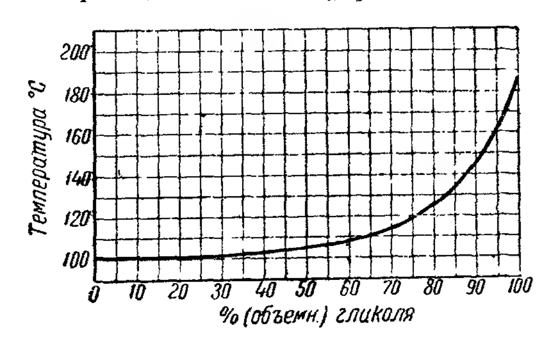
Точно так же, как и у водных электролитов для жидкостных конденсаторов удельное сопротивление электролита для сухих конденсаторов с увеличением количества аммиака падает и его pH увеличивается. Это в свою очередь оказывает влияние на свойства конденсаторов. Как видно из табл. 19, при одном и том же соотношении борной кислоты и этиленгликоля увеличение концентрации аммиака повышает ток утечки и емкость конденсатора и уменьшает его коэфициент мощности и пробивное напряжение.

Поэтому добавляют в электролит аммиака столько, чтобы, по возможности увеличив электропроводность электролита, сохранить в пределах норм ток утечки и пробивное напряжение конденсатора.

Таблица 19

Состав электролита	Ток утечки mA	Емкость μF	Коэфициент мощности, %	Пробивное напряжение, V
1. 25 *см*³ $C_2H_4(OH)_2$ + 45 *г* H_3BO_3 + + 7 *см*³ $NH_4(OH)$ (25%)	1,9	8,41	4,5	531
2. 25 *см*³ $C_2H_4(OH)_2$ + 45 *г* H_3BO_3 + + 14 *см*³ $NH_4(OH)$ (25%)	2,7	9,3	3,9	520

Концентрацию борной кислоты стараются иметь по возможности большой. Изменение ее концентрации мало влияет на электропроводность электролита, так как эти растворы по отношению к борной кислоте являются пересыщенными. Однако большие концентрации борной кислоты, с одной стороны, в силу ее буферного свойства обеспечивают менее резкое изменение pH электролита с изменением его температуры, с другой стороны, в силу пересыщенности раствора при комнатной температуре выпадающие из раствора кристаллы борной кислоты превращают электролит в пастообразную массу.



Фиг. 42. Зависимость температуры кипения гликоля от примеси воды.

По вопросу о том, являются ли выпадающие кристаллы кристаллами борной кислоты или это продукты химического взаимодействия между борной кислотой и растворителем, так называемые «гликоль-бораты» или «глицеробораты», нет установившегося мнения, хотя отдельными исследованиями установлено, что борная кислота с многоатомными спиртами (гликолем, глицерином, маннитом и т. п.) образует соединения по типу маннито-борной кислоты:

$$C_6H_{14}O_6 + H_3BO_3 = C_6H_{15}O_8B + H_2O,$$

которые являются более сильными кислотами, чем борная кислота.

При пропитке бумаги или готовых конденсаторных секций требуется, однако, чтобы электролит был жидким; пастообразный электролит не будет пропитывать секций. Поэтому верхние пределы концентраций борной кислоты ограничены условием, чтобы при температуре пропитки борная кислота полностью находилась бы в растворенном состоянии.

В некоторых случаях, чтобы сделать электролит при комнатных температурах пастообразным (нетекучим), к нему примешивают в процессе варки желатин или крахмал.

Температура варки электролита и ее влияние. В табл. 20 и на фиг. 42 приведены некоторые данные относительно точек кипения водных растворов глицерина и этиленгликоля. Видно, что чем меньше содержание воды в смеси, тем выше точка кипения.

Таблица 20

% глицерина	Точка кипения при давлении 760 *мм*	Вязкость в сантипуазах
0	100,0	0,01364
10	100,9	0,01364
20	101,8	0,01846
30	102,8	0,02585
40	104,0	0,03791
50	106,0	0,05908
60	109,0	0,1031
70	113,6	0,2149
80	121,0	0,5534
90	138,0	2,076
100	290,0	8,30

Растворитель электролита представляет собой не чистый глицерин или этиленгликоль, а содержит некоторое количество воды. Кипячение (варка) электролита с целью повышения его температуры сводится, следовательно, к выпариванию избытка воды. Но вследствие этого выпаривания, как видно из табл. 20, повышается вязкость раствора, что в свою очередь уменьшает электропроводность электролита и повышает его искровое напряжение.

Так как электропроводность рабочего электролита, а следовательно, и искровое напряжение его можно регулировать температурой варки, отпадает необходимость регулировать эти параметры концентрацией электролита, и обычно один и тот же по составу электролит употребляют для многих типов конденсаторов, изменяя лишь температуру его варки.

Например одна из американских фирм применяет рабочий электролит состава:

этиленгликоля	1000 *см*³
борной кислоты	1800 *г*
аммиака (NH_3)	70 »

для конденсаторов и низковольтных, и высоковольтных. В зависимости от рабочего напряжения конденсаторов, в которых он употребляется, электролит прогревают до температур, указанных в табл. 21.

Таблица 21

Рабочее напряжение конденсатора, V	Температура варки, °C	Рабочее напряжение конденсатора, V	Температура варки, °C
До 50	116		
От 50 до 150	122	От 275 до 350	127
» 150 » 275	125	» 350 » 475	129

В табл. 22 приведены некоторые рецептурные данные по изготовлению рабочего электролита для сухих конденсаторов.

Таблица 22

Рабочее напряжение, V	Глицерина $см^3$	Этиленгликоля $см^3$	Борной кислоты г	Аммиака г	pH	Температура варки °C
Для всех типов . .	—	1000	1800	70	—	116—129
Конденсаторы на переменное напряжение 110—220 V . .	—	1000	1000	60	—	132—134
Высоковольтные конденсаторы	1000	—	1200	Пропускается газообразный аммиак до pH, указанного в таблице	5,4—5,5	118—120
	—	1000	1100		—	125
Низковольтные конденсаторы	1000	—	800		5,4—5,5	128

При изготовлении электролита на заданное напряжение значение имеет не только температура, до которой доводится электролит, но и время подогрева его до этой температуры. Чем длительнее прогрев, тем более вязким становится электролит и, следовательно, приобретает большее сопротивление. Так, например, электролит в количестве 25 *л*, нагретый за 1,5 часа до температуры 134°, имеет примерно такие же свойства, как тот же электролит, нагретый до 130° за 2,5 часа.

Поэтому температуру варки электролита для различных типов конденсаторов необходимо устанавливать каждый раз экспериментально, сообразуясь с условиями обогрева.

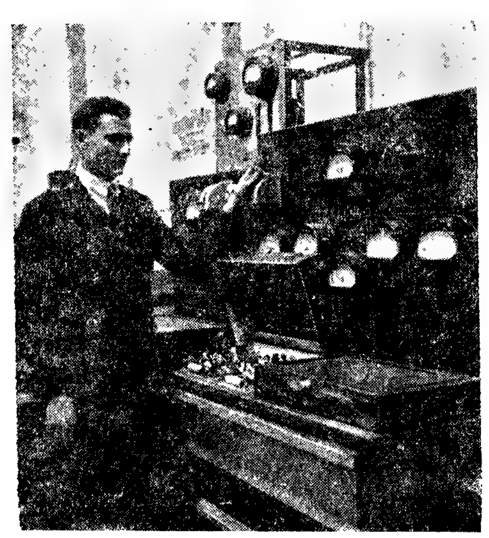
Сравнительные достоинства растворителей оцениваются по тому, насколько стабильными получаются физико-химические свойства электролита в зависимости от изменения его температуры, т. е. насколько стабильны при тех же условиях электрические характеристики конденсаторов с этим электролитом.

Электролиты с этиленгликолем, по сравнению с глицериновыми электролитами, имеют более низкую температуру замерзания и меньшее изменение вязкости с температурой. Это позволяет им в более широком температурном интервале иметь достаточно большую электропроводность, обеспечивающую нормальную работу конденсатора.

Лучшие образцы высоковольтных конденсаторов с глицериновым электролитом могут нормально работать в температурном интервале —10 + 60° С, но обычно уже при +5° они теряют емкость. Конденсаторы с этиленгликолевым электролитом, как правило, нормально работают в интервале температур от —30° до + 80° С.

Низковольтные глицериновые конденсаторы могут нормально работать при более низких температурах, примерно до —20°. Это объясняется тем, что температура варки электролита низковольтных конденсаторов ниже, благодаря чему электролит содержит больше воды. Смеси же глицерина с водой замерзают при температурах более низких, чем чистый глицерин или чистая вода.

Электролиты на этиленгликоле дают конденсаторы лучшего качества, однако для конденсаторов, идущих в комнатную радиоаппаратуру и особенно для конденсаторов низковольтных, с успехом можно употреблять глицериновые электролиты, как более дешевые.



Фиг. 43. Вторичная формовка секций.

За последнее время инженер Гутин предложил к этиленгликолю примешивать этиловый спирт. Первые опыты показывают, что с таким электролитом можно получать конденсаторы, удовлетворительно работающие при температуре —50° С.

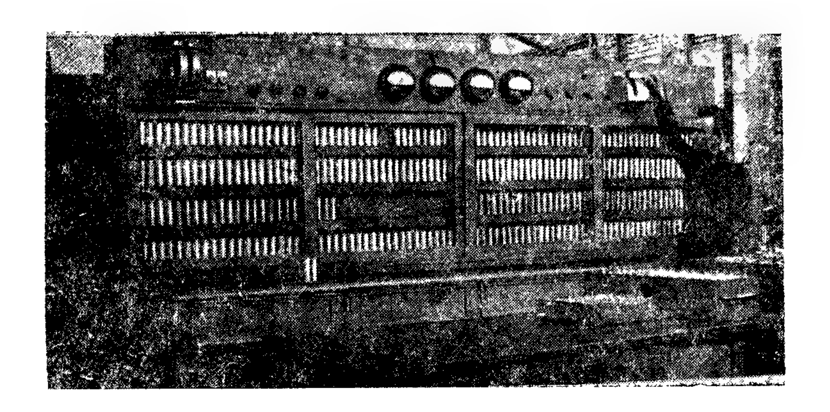
Вторичная формовка (тренировка) готовых конденсаторов. Сейчас же после сборки жидкостные и сухие конденсаторы имеют большой ток утечки. Чтобы довести ток утечки до требуемой минимальной величины, нужно конденсаторы подвергнуть тренировке или вторичной формовке.

Вторичной формовке подвергаются или секции, еще не собранные в корпуса (фиг. 43), или уже готовые собранные конденсаторы (фиг. 44).

Процесс вторичной формовки заключается в следующем. Через группу конденсаторов или конденсаторных секций пропускают ток до тех пор, пока при заданном рабочем или пиковом напряжении конденсаторы не покажут установленного для них тока утечки. Величина пропускаемого тока обычно берется небольшая — около 0,01 mA на 1 $см^2$ анода. При больших токах конденсатор может сильно разогреться и испортиться. Процесс вторичной формовки может длиться от 2 до 8 час. Чтобы избежать последствий короткого замыкания секций и чрезмерного возрастания формующего тока, последовательно с конденсаторами в цепь включают сопротивление, чаще всего лампочки накаливания. Лампочки выгодно употреблять потому, что они одновременно служат и индикаторами хода формовки. По мере ослабления тока утечки лампочки начинают гаснуть, а негаснущие лампочки указывают наличие конденсаторов с коротким замыканием.

Если вторичной формовке подвергают секции, еще не собранные в корпуса, то после сборки конденсаторы дополнительно тренируют

под рабочим или пиковым напряжением 4—8 час., иногда при температуре 40—45°. Это собственно и есть тренировка конденсаторов. При вторичной формовке конденсаторов, уже собранных в корпуса, последняя совпадает с тренировкой.



Фиг. 44. Тренировка сухих конденсаторов.

После тренировки конденсаторы проверяют на ток утечки, емкость и коэфициент мощности. Удовлетворяющие техническим условиям конденсаторы маркируют, снабжают ярлыками и сдают в склад.

V. ВЛИЯНИЕ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РАБОТУ КОНДЕНСАТОРОВ

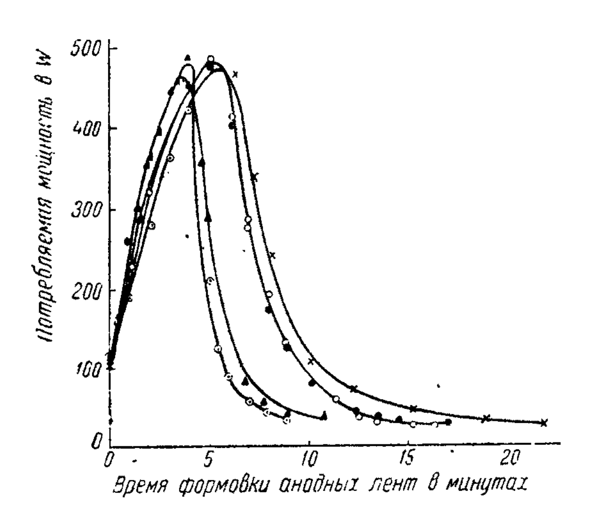
Производство электролитических конденсаторов основано на свойстве алюминия образовывать в некоторых электролитах покровную окисную пленку, пассивную к растворению в этих электролитах. Это свойство алюминия не распространяется в такой же степени на другие металлы; проявляется оно также не во всяких, а только в определенных электролитах. Поэтому наличие в алюминии примесей (других металлов), плохо пассивирующихся в данном составе электролита, вредно, так как окисная пленка начинает проводить электрический ток. Присутствие в электролите ионов, растворяющих окисную пленку алюминия, также вредно влияет на процесс изготовления и на работу электролитических конденсаторов.

1. ВЛИЯНИЕ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В АЛЮМИНИИ

Из примесей в алюминии часто встречается: железо (Fe), кремний (Si), медь (Cu), кальций (Ca), цинк (Zn) и некоторые другие. Наличие вредных примесей в алюминии, идущем для изготовления анодов конденсаторов, прежде всего вредно сказывается в процессе формовки диэлектрика: диэлектрик формуется медленно, с большими затратами энергии. На фиг. 45 показан график формовки алюминия

с различным содержанием примесей. Видно, что чем больше содержание примесей, тем больше расход энергии на формовку пластин, и что различные примеси оказывают разное влияние. Наиболее вредна примесь железа. Так, например, при общей сумме примесей в 0,85% пластина с содержанием железа 0,66% формуется 22 мин., а пластина с содержанием железа 0,25%—17 мин.

Аналогичные результаты получаются и на примере с готовым конденсатором. На фиг. 46 показано влияние различных примесей на ток утечки готового конденсатора. Видно, что наиболее вредное влияние оказывает железо, за ним идут кремний, медь, цинк, магний.



Фиг. 45. Формовка алюминия с различным содержанием примесей.

× Анод с общей суммой примесей 0,87%, в том числе: 0,66% Fe; 0,21% Si; Cu — нет.

○ Анод с общей суммой примесей ∽ 0,84%, в том числе: 0,246% Fe; 0,59% Si; Cu — нет.

● Анод с общей суммой примесей ∽ 0,34% в том числе: 0,23% Fe; 0,11% Si; Cu — нет.

▲ Анод с общей суммой примесей ∽ 0,28%, в том числе: 0,096% Fe; 0,18% Si; Cu — нет.

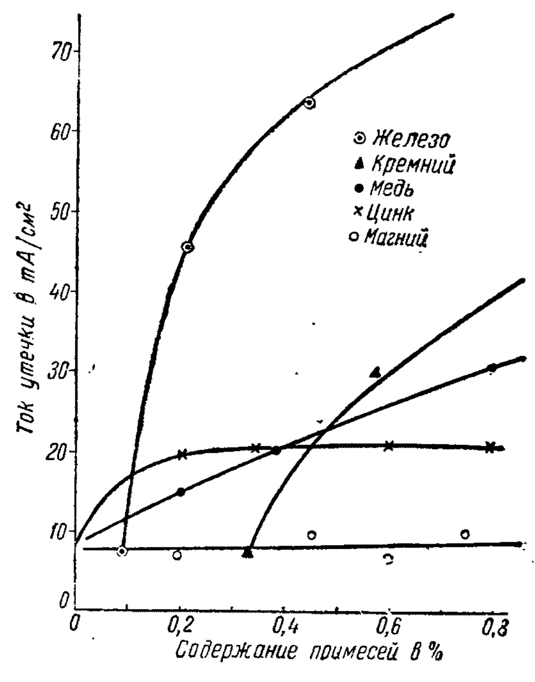
⊙ Анод с общей суммой примесей ∽ 0,23%, в том числе: 0,05% Fe; 0,08% Si; 0,1% Cu.

Влияние примесей на процесс формовки алюминия и ток утечки готового конденсатора тесно связано с коррозийной устойчивостью алюминия. На фиг. 47 представлены результаты следующего опыта: алюминиевые пластинки с разным содержанием различных примесей выдерживались в течение 3 час. в 5%-ном растворе соляной кислоты, и затем измерялись потери в их весе в результате растворения. Оказывается, что величина потерь в весе алюминия в зависимости от состава и количества примесей распределяется, примерно, в такой же последовательности, как и вредное влияние примесей в конденсаторах.

Имеется попытка объяснить подобное влияние примесей в алюминии следующим образом. Железо, находящееся в алюминии, не образует с ним твердого раствора, а дает соединение $FeAl_3$ и смесь Fe—Al, вкрапленные в основную массу металла. Частицы этих соединений поэтому ведут себя аналогично железу при его формовке, т. е. дают пленку из проводящих окислов. Благодаря этим окислам в конденсаторе имеется повышенный ток, а при формовке диэлектрика — медленное спадание тока формовки и большой остаточный ток.

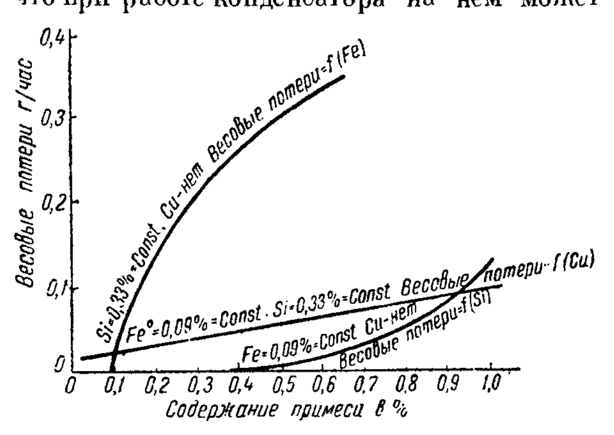
В противоположность железу, соединения алюминия с кремнием дают пленку, менее проводящую, а примесь меди дает твердый раствор. Полагают, что содержание кремния в виде примеси к алюминию в количестве до 0,4% даже повышает коррозийную стойкость алюминия.

В настоящее время при изготовлении конденсаторов стараются брать для анодов алюминий как можно более чистый. Общее содержание примесей должно быть не больше 0,2%. Табл. 23, составленная по данным анализа анодов конденсаторов различных фирм, характеризует чистоту алюминия, применяемого в конденсаторном производстве.



Фиг. 46. Влияние примесей в анодном алюминии на ток утечки конденсатора.

Алюминиевая фольга, идущая для катодов, не требует указанной чистоты, так как не подвергается формовке. Очень чистый алюминий может оказаться здесь даже вредным, потому что при работе конденсатора на нем может постепенно



Фиг. 47. Сопротивление алюминия коррозии.

образоваться оксидная пленка, наличие которой повлечет за собой снижение емкости и увеличение потерь конденсатора. В катодном алюминии допускается 0,5% примесей.

Таблица 23

Фирмы	Fe	Si	Cu	Ca	Ti	Zn	Mg	Sn	Mn
Polymet	0,035	0,060	Нет	0,035	Следы	Нет	Нет	Нет	Нет
Acratest	0,090	0,080	»	0,044	0,060	»	»	»	»
Hydra	0,100	0,070	»	0,008	Следы	0,010	Следы	»	»
Aerovox	0,093	0,051	»	0,006	»	Нет	Нет	»	»
Электросигнал[1] .	0,050	0,100	»	—	—	—	0,002	—	0,001

Но не только примеси могут оказать вредное влияние. Наблюдались случаи, когда химический анализ не обнаружил разницы между хорошей и плохой фольгой, т. е. по чистоте алюминий оказался вполне пригодным, а между тем формовка шла неудовлетворительно. Рентгеновский анализ фольги показал, что кристаллики в этих сортах алюминия были ориентированы (расположены) по-разному. Поэтому всегда требуется, чтобы анодная фольга была отожженной. Отжиг не только делает фольгу мягкой и поэтому удобной для работы, но он устраняет также «вынужденную» ориентацию кристалликов, возникшую при прокатке алюминия в фольгу. Таким образом отжиг улучшает структуру алюминия.

Большое значение имеет состояние поверхности алюминиевой фольги. При прокатке алюминия в фольгу на его поверхности могут оставаться кусочки железа от прокаточных вальцов, могут также образоваться расслоения поверхности, трещины и т. п. Кроме того, после прокатки алюминиевая фольга не всегда тщательно отмывается от масел, применяемых при прокатке.

В табл. 24 и 25 дана сводка результатов исследования влияния дефектов и загрязнения поверхности на ток утечки конденсаторов. Видно, что чем более загрязнена поверхность маслом, тем выше ток утечки; чем более испорчена поверхность, тем утечка также больше.

Таблица 24

Площадь загрязненной маслом поверхности, *мм*^{2}	Ток утечки, mA
0	0,46
25	0,67
34	0,83
42	0,89
51	0,92

Таблица 25

Состояние поверхности	Ток утечки, mA
Чистая, гладкая	0,28—0,32
Со ссадинами и царапинами	0,39—0,95
С рванинами и ссадинами	0,99—4,34
С рванинами, ссадинами и расслоениями	1,94—2,84

Формовка такой фольги также сопряжена с большими затруднениями.

[1] Согласно Э. Т. Т. на алюминий.

Заводы, изготовляющие конденсаторы, стараются получать фольгу достаточно чистую и лишенную указанных дефектов. Но иногда, особенно при изготовлении жидкостных конденсаторов, где заготовка анода связана с неизбежным загрязнением, производят специальную очистку поверхности алюминиевой фольги химическим способом. Для удаления жировых загрязнений фольгу протравляют в растворах щелочей или солей с сильным основанием и слабой кислотой, а для удаления металлических включений протравляют фольгу в кислотах, чаще всего в азотной.

Для примера опишем два способа очистки поверхности анодного аюминия от жировых загрязнений.

Первый способ состоит в том, что анодную фольгу погружают в раствор 22,3 *г* бихромата калия $K_2Cr_2O_7$ в 1 *л* концентрированной серной кислоты H_2SO_4 (удельного веса 1,84). Температура раствора комнатная. Продержав в этом растворе фольгу 5—8 мин., вынимают ее, дают стечь раствору, после чего тщательно промывают сначала проточной водой из городского водопровода, а затем троекратно в горячей дистиллированной воде с последующим газированием (см. ниже).

Второй способ состоит в том, что фольгу опускают в 3%-ный раствор щелочи KOH или NaOH при температуре 50—60° и выдерживают там в течение приблизительно 10 мин. После этого фольгу вынимают и промывают, как описано выше.

Предпочтение нужно отдать кислотному методу очистки. Очистка раствором бихромата калия в серной кислоте основана на том, что он, окисляя органические вещества (в данном случае жиры), растворяет их, освобождая от них поверхность. Вместе с жирами растворяются и инородные металлические включения. В то же время алюминий не растворяется, так как он в этом растворе легко пассивируется (создается окисная пленка). Как правило, очищенный таким образом алюминий формуется значительно быстрее. Очистка же в щелочах основана на омылении жиров. Однако минеральные масла щелочью не омыляются и поэтому очистка от них в щелочи проходит значительно труднее. Приходится рассчитывать в этом случае на механическое удаление масла с поверхности водородом, выделяющимся при растворении алюминия. Очистка в щелочах имеет еще тот недостаток, что сопровождается растворением алюминия. Таким образом происходит некоторая потеря основного металла, в то время как включения тяжелых металлов, таких, как железо, остаются на поверхности, не растворяясь в щелочи. Для удаления их обычно требуется дополнительная очистка фольги в азотной кислоте.

2. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

Существенно влияет на качество конденсатора чистота составных частей рабочего и формовочных электролитов. Формовочные растворы особенно чувствительны даже к следам загрязнений. Поэтому химикаты, входящие в состав электролита для первичной формовки, должны быть чрезвычайно чисты. Особенно вредное действие на формовку и на качества готового конденсатора оказывает наличие в электролите хлоридов и сульфатов.

Влияние хлора на процесс первичной формовки проявляется в том, что формовка идет значительно медленнее и окончательные значения тока на ванне выше, чем в чистом электролите. Уже содержание в формовочном электролите хлора 0,001% заметно ухудшает процесс формовки, а при содержании хлора в количествах 0,0015—0,005% алюминий практически не формуется, поверхность анода корродирует и делается шероховатой.

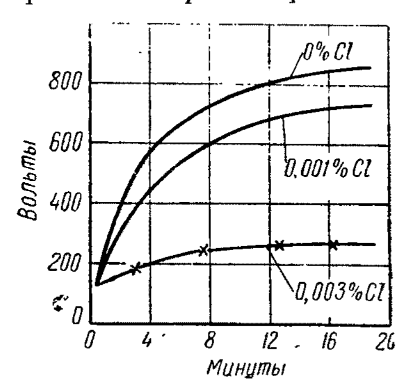
На фиг. 48 показано влияние примесей хлора в формовочном электролите на процесс первичной формовки.

Присутствие хлора уменьшает также искровое и максимальное напряжения.

Влияние сульфата SO_4'' на процесс формовки аналогично влиянию хлора. Присутствие небольшого количества SO_4'' замедляет формовку и вызывает коррозию анодной пластины. При определенной концентрации ионов SO_4'' (около 0,0012%) формовка практически прекращается, т. е. напряжение на анодах не повышается и ток утечки не спадает.

Примеси хлора и SO_4'' в формовочном электролите могут быть допущены только в пределах, при которых нет совершенно никаких признаков коррозии на поверхности анодов. Как показывает опыт, без ущерба процессу формовки в электролите может быть допущена концентрация хлора, примерно, 0,0001%, а концентрация SO_4'' до 0,0006%.

В готовый конденсатор хлор может попасть вследствие того, что примеси хлора содержатся в недостаточно очищенном глицерине или этиленгликоле, в загрязненной борной кислоте и аммиаке, применяемых при изготовлении рабочего электролита. Наконец, хлор может содержаться в бумаге или марле, применяемых в качестве прокладок.



Фиг. 48. Влияние примесей хлора на процесс формовки.

Опытом установлено, что если конденсаторы изготовить с чистым от загрязнений электролитом, но с бумагой, содержащей от 0,05 до 0,004% хлора, то они при испытании на продолжительность работы под напряжением начинают выбывать из строя. Чем больше было хлора в бумаге, тем быстрее конденсаторы приходили в негодность. Вскрытие таких конденсаторов показывает, что на анодных пластинах имеются следы коррозии, а анодные выводы вовсе разрушены коррозией.

Это доказывает, что хлор, присутствующий в готовом конденсаторе, разрушает оксидную пленку, вызывает коррозию анодной пластины и сокращает срок службы конденсатора. Поэтому необходимо, чтобы бумага, применяемая в качестве прокладки (как и все остальные

материалы), содержала возможно меньшее количество хлора. Бумажная прокладка может содержать хлора не больше 0,003%.

Опасными являются не только загрязнения в рабочем электролите или в бумажной прокладке, но и те, которые могут попасть на поверхность анода, например, от рук рабочего. Так, аноды, которых не трогали грязными руками, дали средний ток утечки через 2 минуты 4,1 mA; аноды же, слегка тронутые пальцами, дали средний ток утечки через 2 мин. 7,7 mA. Аноды, сильно потертые пальцами, дали через 2 мин. средний ток утечки 60 mA. Столь сильное влияние объясняется тем, что пот, выделяющийся руками рабочего, содержит хлориды, которые разрушающе действуют на анодную пленку. Поэтому рабочие, имеющие дело с заформованной фольгой или другими очищенными деталями (формовщики, закатчики, сборщицы), должны иметь на руках хорошо промытые резиновые перчатки.

В силу указанных выше причин все материалы, идущие на изготовление электролитических конденсаторов, должны иметь возможно высокую степень чистоты. Чтобы обеспечить эту чистоту, материалы предварительно подвергают химическому контролю и только после этого пускают в производство.

Отдельные детали конденсатора, прежде чем направить их на окончательную сборку, также подвергают специальной очистке. Очищать необходимо следующие детали и оборудование: 1) аноды мокрых конденсаторов, 2) держатели этих анодов, 3) корпуса, 4) колпачки, 5) заклепки, 6) шайбы, 7) резиновые клапаны, прокладки, пробки, 8) эбонитовые изоляторы и 9) ванны для формовки анодов.

Ниже описываются наиболее распространенные способы очистки деталей, кроме анодов, процесс очистки которых описан выше.

Очистка формовочной ванны. Прежде чем ванну заливать формовочным электролитом, ее промывают горячей водой или горячим паром из шланга и протирают всю поверхность щеткой, чтобы снять все твердые осадки, оставшиеся от предыдущих формовок. После протирки снова промывают ванну горячей водой или паром и затем еще раз промывают дистиллированной водой. После промывок водой ванну заливают 5%-ным раствором борной кислоты и кипятят этот раствор несколько минут. Если после кипячения химический анализ не обнаружит в растворе хлора, то ванна считается чистой и готовой для заполнения формовочным электролитом.

Очистка алюминиевых деталей (корпусов, колпачков, заклепок) имеет целью главным образом обезжиривание. Детали очищают в горячем растворе 3—5%-ной едкой щелочи ($NaOH$), буры или соды. Одна из американских фирм рекомендует очищать алюминиевые детали следующим методом:

а) опустить детали на 15 сек. в кипящий 0,1%-ный раствор буры, после чего вынуть их и сполоснуть дистиллированной водой;

б) опустить детали на 15 сек. в теплую дистиллированную воду, вынуть и сполоснуть холодной дистиллированной водой.

Очистка резиновых и эбонитовых деталей (прокладок, пробок, клапанов) преследует цель избавиться от примесей хлора и сульфатов.

Очистку ведут так:

а) Резиновые и эбонитовые детали опускают в 0,1%-ный раствор каустической соды NaOH и кипятят в нем 1 час. После этого детали вынимают и промывают дестиллированной водой. Эта операция (всякий раз со свежим раствором) повторяется три раза.

б) После операции «а» детали кипятят дважды по одному часу в 0,1%-ном растворе буры и затем дважды промывают в дестиллированной воде.

После такой очистки детали до сборки хранят в дестиллированной воде.

3. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ, И ИХ ЧИСТОТА

Борная кислота представляет собой бесцветные чешуйчатые кристаллы или кристаллический порошок белого цвета. Она применяется для приготовления формовочных и рабочих электролитов в производстве сухих и мокрых электролитиков. Борная кислота считается пригодной, если по содержанию примесей удовлетворяет требованиям, приведенным в табл. 26.

Таблица 26

Химический состав	Норма в %
Содержание борной кислоты	Не менее 99,5
Содержание хлоридов (в пересчете на хлор)	Не более 0,0001
Содержание сульфатов (в пересчете на SO''_4)	» 0,0005
Содержание фосфатов (в пересчете на PO_4''')	» 0,001
Содержание металлического кальция	» 0,005
Содержание тяжелых металлов группы H_2S	» 0,0005
Содержание железа	» 0,0005
Содержание мышьяка	» 0,0002
Вещества нелетучие при обработке HF	» 0,05

Глицерин по химической классификации относится к трехатомным спиртам. Химически чистый глицерин представляет собой бесцветную, сиропообразную жидкость сладковатого вкуса. Чистый глицерин имеет точку плавления +17° и кипит при 290°; он хорошо растворяет борную кислоту и с водой смешивается в любых отношениях. В производстве электролитических конденсаторов употребляется для приготовления рабочего электролита.

По содержанию загрязнений допускается хлоридов (в пересчете на Cl′) не больше 0,0001% и сульфатов (в пересчете на ион SO_4'') не более 0,0005%. Содержание чистого глицерина должно быть не менее 98%.

Этиленгликоль представляет собой слегка сладковатую прозрачную и бесцветную жидкость. По химической классификации этиленгликоль — двухатомный спирт с удельным весом 1,115; температура кипения 197,5°; замерзает при —17,4°. Этиленгликоль, как и глицерин, применяется для приготовления рабочего электролита, но в отличие от глицерина обладает некоторыми преимуществами,

так как он даст возможность расширять температурный диапазон работы конденсатора.

При производстве электролитических конденсаторов к этиленгликолю предъявляют следующие требования:

Этиленгликоль должен представлять собой прозрачную бесцветную жидкость без видимых невооруженным глазом посторонних примесей или осадков. Содержание этиленгликоля должно быть не меньше 98%. Реакция — нейтральная. Содержание золы при сжигании не должно превышать 0,05%. Содержание хлор-иона должно быть не более 0,0001%. Содержание SO_4''-иона — не более 0,0005%.

Алюминиевая фольга, употребляемая для анодов, обычно имеет толщину от 0,05 до 0,1 *мм*; она должна быть свернута в рулон, торцы которого не должны иметь надрывов, вмятин и заусенцев.

Поверхность фольги должна быть гладкой, ровной, чистой, без слоистости, пятен, коррозии, без каких-либо следов смазки. Для катодной пластины применяется алюминиевая фольга такой же ширины, как и анодная, но толщиной 0,015 *мм*. По химическому составу фольга должна удовлетворять следующим требованиям:

Наименование пластины	Содержание Al в %, не менее	Содержание примесей в %, не более					
		Fe	Si	Mn	Cu+Zn	Fe+Si	Всего примесей
Анодная	99,85	0,08	0,1	0,001	0,002	0,15	0,15
Катодная	99,5	0,18	0,32	—	0,05	0,5	0,5

Бумага, применяемая в качестве прокладки в сухих электролитических конденсаторах, должна удовлетворять следующим требованиям: толщина листа — 80—100 μ; содержание хлоридов (в пересчете на Cl') — не более 0,003%; содержание сульфатов (в пересчете на ион SO_4'') — не более 0,005%; содержание железа в виде соединений (в пересчете на чистое железо) не более 30 *мг* на 100 *г* сухой бумаги; впитываемость по Клемму за 10 мин. не менее 45—50 *мм*.

Бура, лимонная кислота, молибденовокислый аммоний и 25%-ный раствор аммиака, применяемые для приготовления формовочного электролита, должны быть химически чистыми, согласно требованиям ОСТ.

В производстве электролитических конденсаторов широко применяется дистиллированная вода. По данным Э. Т. Т. дистиллированная вода для электролитических конденсаторов должна удовлетворять следующим условиям:

Удельное сопротивление	не ниже 300 000 Ω
Сухой остаток при выпаривании	не более 3 *мг/л*
Зольность	» » 1,5 *мг/л*
Может содержать:	
хлориды (в пересчете на Cl')	» » 0,3 »
сульфаты (в пересчете на SO_4'')	» » 1,0 »

Вода должна храниться в стеклянных бутылях с резиновыми пробками. Трубопроводы для дестиллированной воды должны изготовляться из алюминиевых или луженых медных трубок.

Резиновые материалы. Клапанная резина и резиновые пробки, употребляемые в мокрых электролитиках, изготовляются из обыкновенной коммерческой резины. В составе этой резины не должно быть хлоридов (в пересчете на Cl′) больше, чем 0,0005%; сульфатов (в пересчете на SO_4'') не должно быть больше 0,25% после четырех-десятиминутного кипячения этих деталей в дестиллированной воде.

Перфорированные эбонитовые (твердая резина) прокладки, устанавливаемые в мокрых электролитиках для предупреждения короткого замыкания между анодом и корпусом, по содержанию хлоридов и сульфатов должны удовлетворять тем же требованиям, что и резиновые детали.

Прессшпановые и бумажные детали. Кабельная бумага, идущая на обертку секций сухих электролитических конденсаторов, не должна содержать хлоридов больше 0,003% и сульфатов больше 0,005%.

Прессшпановые гильзы, применяемые в качестве корпусов для некоторых типов сухих электролитиков, и прессшпановые прокладки, которые применяются для предупреждения проникновения заливочной массы с торцов внутрь секции, не должны содержать хлора больше 0,02% и сульфатов больше 0,06%.

Заливочная масса. Заливочная масса (битум), применяемая для заливки секций сухих электролитиков после помещения их в прессшпановые или алюминиевые корпуса, должна удовлетворять следующим требованиям:

а) должна иметь температуру плавления не ниже 95°;

б) должна иметь нейтральную реакцию;

в) не должна реагировать с аммонием, этиленгликолем и борной кислотой;

г) должна быть негигроскопична и иметь достаточно высокое напряжение пробоя;

д) хорошо приставать к алюминию и прессшпану.

VI. ТРАВЛЕНИЕ АНОДОВ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ИХ ПОВЕРХНОСТИ

1. ТРАВЛЕНИЕ АНОДОВ

Как известно, по величине удельной емкости электролитический конденсатор превосходит все существующие типы электрических конденсаторов. Однако и он не может удовлетворить всем требованиям современной техники в отношении веса и размеров. В ряде случаев требуется конденсатор с уменьшенным весом, имеющий значительно меньший объем, чем нормальный электролитический конденсатор. Такие, особо малых размеров, электролитические конденсаторы можно создать, увеличивая активную поверхность анодной пластины.

Способов увеличения активной поверхности несколько; все они сводятся к тому, чтобы соответствующей обработкой сделать поверхность пластины шероховатой, с выступами и углублениями. По характеру обработки поверхности можно эти способы разбить на три группы: механические, электрохимические и химические.

Из механических способов наибольшего внимания заслуживает способ обработки поверхности песочными ударами. Поверхность алюминиевой фольги подставляется под удары песка, выталкиваемого силой сжатого воздуха. Песчинки — тверже алюминия и оставляют на его поверхности царапины и углубления, увеличивающие общую поверхность фольги. Хотя этот метод не влечет за собой потери основного металла и не требует после обработки особой очистки, так как не загрязняет поверхность никакими вредными примесями, тем не менее он не получил распространения, так как стоит он сравнительно дорого, а увеличивает удельную поверхность не больше, чем на 50%.

Электрохимические способы основаны на том, что при электролизе раствора соляной кислоты или ее соли (чаще всего употребляют поваренную соль) с алюминиевым анодом выделяющийся на аноде хлор разъедает поверхность, делая ее шероховатой. Эти методы аналогичны методам химическим, но имеют то преимущество, что при работе электролитические ванны не выделяют газов, вредно действующих на здоровье рабочих, как это наблюдается при химических методах обработки поверхности. К сожалению, эти методы еще мало разработаны и поэтому не получили большого распространения.

Химические методы обработки (травление) поверхности анодной фольги получили наибольшее распространение. Травление производится главным образом в растворе соляной кислоты. Если алюминиевую пластину погрузить в соляную кислоту, то начинается энергичная реакция кислоты с алюминием. Происходящее химическое взаимодействие может быть представлено следующим уравнением:

$$2\,Al + 6\,HCl = 2\,AlCl_3 + 3H_2.$$

Действие кислоты на алюминий неравномерно, в результате чего поверхность фольги становится шероховатой, покрытой выступами и углублениями. Такое действие кислоты на алюминий может быть усилено или замедлено соответствующим подбором концентрации и температуры раствора, а также длительностью пребывания фольги в травильной ванне. Результаты травления сильно зависят от чистоты поверхности и структуры самого металла. Например твердый алюминий будет травиться иначе, чем мягкий. Поэтому режим травления должен быть выбран для каждого сорта фольги отдельно. Для алюминия чистотой 99,8%, который обычно употребляется для анода электролитического конденсатора, удовлетворительные результаты могут быть получены изменением времени выдержки фольги в ванне, но иногда бывает необходимо менять концентрацию соляной кислоты и температуру ванны.

Травлением в кислоте активная поверхность алюминиевой фольги может быть значительно увеличена. Если травление сделано должным образом, то активную поверхность можно увеличить в несколько раз, благодаря чему общая площадь анодной фольги для данной емкости может быть значительно уменьшена. В результате этого экономится фольга, материал для прокладок, электролит, а также значительно уменьшаются вес и размеры готового конденсатора. Например нормальный тип электролитического конденсатора на 450 V рабочего напряжения и 10 μF емкости с максимальными размерами 35 × 130 *мм*[1] весит 120—130 *г*, а конденсатор с травленой анодной фольгой на 450 V и 10 μF имеет размеры 21 × 70 *мм* и весит 25—30 *г*.

В СССР применяются два метода травления анодной фольги.

Первый из них состоит в следующем: алюминиевую пластину перед травлением опускают в 3%-ный раствор щелочи (NaOH или KOH), нагретый до температуры около 50°. Выдержав пластину в этом растворе около 3 мин., вынимают и промывают ее в проточной воде. Целью этой операции является обезжиривание фольги. Хотя при этом и растворяется алюминий, но, как показывают измерения, это растворение идет более или менее равномерно по всей поверхности фольги. При наличии достаточно чистой поверхности эту операцию можно не проводить.

После такой предварительной подготовки фольгу опускают в травильный раствор, составленный по следующему рецепту:

Соляной кислоты (уд. в. 1.18)	150 *см*³
Азотной кислоты (уд. в. 1.4)	100 »
Воды	1000 »

В этом растворе пластину выдерживают, в зависимости от требуемого увеличения поверхности и структуры металла, 6—10 мин. при температуре 85—90°. Затем вынимают ее и промывают сначала проточной водой, а затем дестиллированной водой, нагретой до температуры 60—70°. В дестиллированной воде следует промывать фольгу до тех пор, пока промывные воды перестанут показывать присутствие хлоридов; для этого обычно требуется не больше трех промывок. Такой метод протравки может увеличить поверхность алюминиевой фольги в 3—4 раза.

Второй метод заключается в том, что травят фольгу не в смеси кислот, а в одной соляной кислоте с прибавкой хлорной меди.

Травильная ванна в этом случае составляется по следующему рецепту:

Воды	1000 *см*³
Соляной кислоты (уд. в. 1.18)	200 »
Хлорной меди ($CuCl_2$)	0.01%

Температура ванны 60—65°; время протравки 3—6 мин.

Промыв фольгу в водопроводной воде, опускают ее на 3—5 мин. в 50%-ный раствор азотной кислоты (HNO_3) при комнатной темпера-

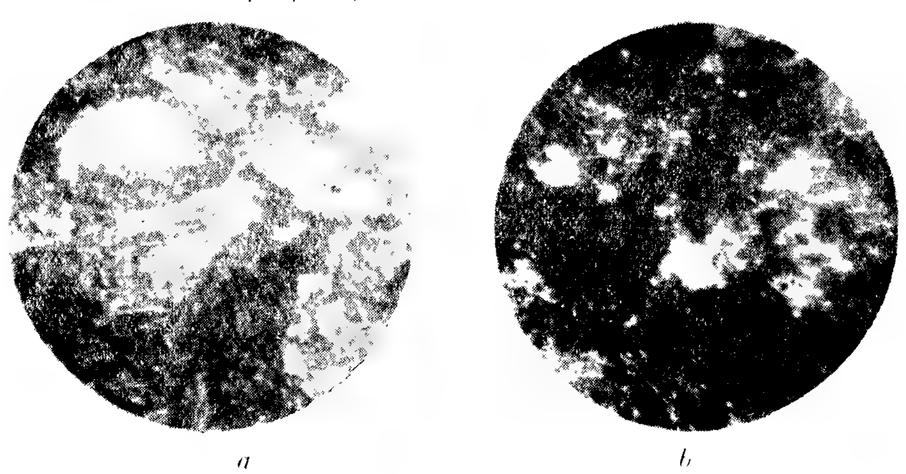
[1] Первые цифры обозначают диаметр, а вторые—высоту корпуса конденсатора.

суре и затем подвергают промывке, как и в первом случае. Дополнительная протравка в азотной кислоте в этом случае требуется для удаления с поверхности фольги меди, выделившейся на ее поверхности в результате реакции:

$$2Al + 3CuCl_2 = 2AlCl_3 + 3Cu.$$

Этим способом удается увеличить поверхность фольги в 4—6 раз.

На фиг. 49 показаны фотоснимки протравленной поверхности алюминиевой фольги по первому (*a*) и второму (*b*) методам. Видно, что первый метод протравки дает более крупнозернистую структуру поверхности с небольшой протравкой в глубину. Второй метод дает более мелкую структуру протравленной поверхности и в то же время более глубокую протравку.



Фиг. 49. Фотоснимки поверхности протравленного алюминия.

Некоторые американские фирмы применяют более концентрированные травильные растворы, доводя концентрацию соляной кислоты до 30—40% и соответственно уменьшая время травления.

Травление анодной фольги производится или опусканием фольги в травильную ванну (так называемый статический метод травления) или протягиванием ее через травильную ванну (динамический метод протравки). Динамический метод, хотя и требует более сложного оборудования, все же предпочтительнее.

Он позволяет производить более равномерную протравку поверхности фольги, дает большую производительность и требует меньше рабочих. При травлении фольги динамическим способом степень протравки легко регулировать скоростью протягивания ленты через травильную ванну.

В процессе травления в травильной ванне, естественно, накапливается хлорный алюминий ($AlCl_3$), получающийся в результате реакции соляной кислоты с алюминием. Помимо того, что эта реакция уменьшает постепенно концентрацию соляной кислоты, переводя ее в алюминиевую соль, благодаря чему снижается скорость

травления, наличие в травильном растворе хлорного алюминия ($AlCl_3$) само по себе неблагоприятно действует на процесс травления.

При большом содержании $AlCl_3$ в растворе травление получается неоднородным по поверхности фольги и неглубоким, что резко снижает емкость. Кроме того, время, необходимое для формовки фольги, травленой в растворе с повышенным содержанием $AlCl_3$, увеличивается. Неблагоприятное действие $AlCl_3$ на процесс травления тем больше, чем больше его концентрация в травильном растворе.

Так как полностью избавиться от $AlCl_3$ в травильном растворе почти невозможно, наиболее важной задачей является необходимость поддерживать его концентрацию в допустимых пределах. С этой целью и для поддержания необходимой концентрации соляной кислоты (HCl) травильный раствор в ванне непрерывно сменяется: отработанному раствору дают все время стекать в таком количестве, в каком прибывает свежий раствор.

Степень протравки фольги контролируют, определяя емкость заформованной пластинки определенного размера и сравнивая ее с емкостью непротравленной пластинки такого же размера. Это наиболее объективный метод, но он пригоден только в том случае, когда протравливают в одинаковых условиях большое количество фольги, например целый рулон, в случае, когда травление ведут динамическим способом. Если же травление производится статическим способом, когда часто травится в отдельности каждая анодная пластинка, тогда таким способом производить контроль невозможно.

В этом случае качество протравки определяют «на-глаз», или рассматривая поверхность в лупу. При достаточном навыке рабочего таким образом можно получить приблизительную оценку. Считается, что при хорошей протравке поверхность фольги должна быть серой с проблесками чистого нетравленого алюминия, распределенными равномерно по всей поверхности. Отсутствие этих проблесков (при этом поверхность фольги имеет сплошной матовый цвет) свидетельствует о том, что фольга перетравливается.

Химические методы увеличения поверхности алюминиевой фольги, основанные на неравномерном растворении алюминия в соляной кислоте, получили наибольшее распространение, как наиболее простые и эффективные. Недостатком их является, во-первых, потеря алюминия благодаря растворению и, во-вторых, вредность для здоровья рабочих, занятых на этой операции, так как обработка ведется в сильно концентрированных растворах соляной кислоты, которая в больших количествах выделяется из раствора при повышенных температурах. Большой летучести соляной кислоты способствует также бурное выделение водорода. Так как соляная кислота, кроме того, является наиболее вредным загрязнением в конденсаторном производстве, то рекомендуется травление производить в отдельном, изолированном от остального производства помещении с хорошей вентиляцией.

С этой точки зрения многообещающими являются электрохимические способы протравки, которые, к сожалению, до сих пор мало разработаны. Когда впервые применили травленую фольгу

в качестве анодов для сухих электролитических конденсаторов, считали, что срок службы таких конденсаторов будет значительно ниже, чем у конденсаторов, аноды которых сделаны из нетравленой фольги. Основаниями для таких опасений служило следующее: во-первых, на одну и ту же емкость в случае травленых анодов в конденсаторах будет приходиться меньшее количество электролита, а следовательно, он будет быстрее израсходован, во-вторых, в углублениях шероховатой поверхности протравленной фольги может задерживаться получившийся в результате электролиза гремучий газ (смесь кислорода с водородом), который от искрения будет взрываться, вызывая повреждение анодной фольги. Однако опыт показал, что продолжительность работы этих конденсаторов почти такая же, как конденсаторов с нетравленой анодной фольгой.

В табл. 27 дана сводка результатов испытаний сроков службы при температуре +50° и рабочем значении приложенного напряжения постоянного тока для конденсаторов с нетравленой анодной фольгой (450 V рабочего напряжения, 10 μF емкости) и с травленой фольгой (450 V рабочего напряжения, 20 μF емкости). Травление производилось в растворе соляной кислоты с добавкой хлорной меди по рецепту, приведенному на стр. 90. При этом активная поверхность анодной фольги увеличена в 5 раз.

Таблица 27

№ измерения	С нетравленой фольгой				С травленой фольгой			
	ток утечки, mA	емкость, μF	коэфициент мощности, %	Измерение производилось через	ток утечки, mA	емкость, μF	коэфициент мощности, %	измерение производилось через
1	0,36	16,5	3,0	125 час.	0,14	24,5	18,3	75 час
2	0,54	16,3	2,9	270 »	0,22	24,0	18,3	150 »
3	0,2	16,0	2,9	437 »	0,28	22,9	25,0	390 »
4	0,45	15,7	3,4	663 »	0,18	20,9	26,0	840 »
5	0,14	15,5	3,3	1100 »	0,17	20,0	30,6	1230 »
6	0,08	14,8	2,7	1500 »	0,13	18,3	33,7	1470 »

Видно, что после непрерывной работы в течение 1500 час. емкость конденсаторов с травленой фольгой уменьшилась примерно на 25%, а емкость конденсаторов с нетравленой фольгой — на 10%. Разница сравнительно небольшая, особенно если учесть, что по техническим условиям передовых американских фирм, производящих электролитические конденсаторы, уменьшение емкости до 30% считается вполне нормальным, если конденсатор находился под напряжением, равным его рабочему напряжению, в течение 1000 час. при температуре +60°. Ток утечки у конденсаторов с травленой фольгой обычно меньше, чем у конденсаторов с нетравленой анодной фольгой.

Более существенным недостатком сухих электролитических конденсаторов с травленым анодом являются диэлектрические потери, которые в этих конденсаторах значительно больше, чем в конденсаторах с нетравленой фольгой. Это происходит потому, что тангенс угла потерь у электролитических конденсаторов (как будет показано ниже) во многом зависит от удельного сопротивления электролита.

В травленом аноде на единицу площади прилегающего к аноду электролита приходится емкость значительно бо́льшая, чем при нетравленой анодной фольге. Следовательно, при одной и той же толщине слоя электролита с увеличением удельной емкости будут увеличиваться потери конденсатора.

У конденсаторов с жидким электролитом аноды из травленой фольги, наоборот, обычно улучшают коэфициент мощности. Это объясняется тем, что длина пути тока от катода (корпуса) через электролит к аноду в конденсаторе с травленым анодом меньше, чем в конденсаторе с нетравленым анодом. Иногда это уменьшение длины пути вызывает уменьшение коэфициента мощности большее, чем увеличение его емкости в результате травления. Это особенно заметно на конденсаторах высокой емкости и высокого напряжения, где требуется длинная анодная фольга.

В самое последнее время американская фирма Мэллори применила следующий заслуживающий внимания способ увеличения удельной емкости конденсатора. На полоску обыкновенного тонкого полотна распылением наносится тонкий слой алюминия. После нанесения алюминиевого слоя две такие полоски требуемого размера складываются вместе и подвергаются процессу формовки, как и обычная алюминиевая фольга. Отформованные полоски применяют в качестве анодов для электролитических конденсаторов. Благодаря большой пористости полотна удельная емкость такого анода получается примерно в 30 раз большей по сравнению с обычной алюминиевой фольгой.

2. ТРАВЛЕНИЕ КАТОДОВ

Выше было выяснено, что на поверхности алюминия даже при обычных атмосферных условиях может образоваться оксидная пленка. Пленка может образоваться и при окислении алюминия в электролите. Следовательно, пленки могут образоваться и на катоде конденсатора. Правда, эти пленки вообще значительно тоньше чем пленки, полученные электролитическим путем на аноде. Тем не менее, и они могут оказывать влияние на характеристики конденсатора, особенно жидкостного, где анодом служит корпус со сравнительно небольшой поверхностью.

Пленка на катоде может образовываться электролитическим путем во время нормальной работы конденсатора, когда к нему подводится не только постоянное напряжение, но и постоянное с наложенной переменной составляющей.

В результате наличия оксидной пленки на катоде между катодом и электролитом появляется емкость (см. табл. 34, стр. 123), ко-

торая, включаясь последовательно с емкостью анодной пластины, снижает емкость конденсатора. С другой стороны, катодная пленка представляет электрическому току омическое сопротивление, из-за чего увеличивается коэфициент мощности конденсатора.

Устранить это вредное влияние катодной пленки можно двумя способами. Первый, применяемый для жидкостных конденсаторов, состоит в том, что внутреннюю поверхность корпуса конденсатора покрывают неоксидирующимся металлом, например хромом или медью. Этот способ мало выгоден, так как, кроме того, что он связан с трудностями покрытия, он еще вносит в конденсатор другие металлы.

Второй способ заключается в том, что внутреннюю поверхность корпуса или катодную фольгу в сухом конденсаторе подвергают протравке с целью увеличения эффективной поверхности. Появившаяся на протравленной поверхности пленка обладает значительно большей емкостью, которая соответственно меньше сказывается на действительной емкости конденсатора. Кроме того, благодаря увеличению поверхности снижается плотность переменной составляющей тока и, следовательно, уменьшается тенденция к электролитическому образованию пленки.

В табл. 28 приведены результаты исследований конденсаторов, собранных в одном случае в корпусах с протравленной поверхностью, во втором случае с нетравленой и в третьем с хромированной внутренней поверхностью.

Таблица 28

Тип корпуса	Первоначальные характеристики		Характеристики после 66 час. испытания	
	емкость, μF	коэфициент мощности, %	емкость, μF	коэфициент мощности, %
Из нетравленого алюминия	18,3	6,4	16,5	8,5
Из травленого алюминия	19,4	6,3	19,8	7,0
Из хромированного алюминия	19,4	6,25	19,7	7,0

Емкость и коэфициент мощности этих конденсаторов измеряли сейчас же после сборки и затем после 66 час. работы конденсаторов с наложенной переменной составляющей напряжения, приблизительно в два раза большей нормальной.

Видно, что первоначальная емкость конденсаторов с нетравлеными корпусами почти на 6% ниже, чем других конденсаторов. После 66 час. работы конденсаторы с травлеными и хромированными корпусами остаются практически неизменными; некоторое увеличение емкости произошло вследствие уменьшения толщины анодной пленки. Конденсаторы же с нетравлеными корпусами за это время снизили емкость, примерно, на 10%.

Опыт производства конденсаторов с травлеными анодами и катодами и результаты работы этих конденсаторов оказались настолько удовлетворительными, что можно с уверенностью ожидать все большего внедрения этих методов в производство не только жидкостных, но и сухих конденсаторов.

3. ГАЗИРОВАНИЕ АНОДНОЙ ФОЛЬГИ

Ранее уже было выяснено, что хлор является наиболее вредной примесью. Поэтому удаление даже следов хлора с поверхности алюминиевой фольги после протравки имеет очень существенное значение. В процессе травления хлор попадает в поры протравленной поверхности, откуда вымыть его очень трудно. Для наилучшего его удаления с протравленной поверхности применяется так называемое «газирование» анодной фольги. Опустив алюминиевую пластинку в кипящую воду, мы заметим очень бурное выделение на поверхности пластинки газа. Выделяющийся газ, очевидно, является водородом, получающимся в результате реакции воды с алюминием:

$$Al + 3H_2O = Al(OH)_3 + 3H.$$

Если процессу газирования подвергается протравленная фольга, то выделяющийся водород захватывает с собой и выталкивает из пор протравленной поверхности попавшие туда хлориды, окончательно очищая от них поверхность.

Однако роль газирования на этом не заканчивается. Появляющаяся в результате этой реакции гидроокись алюминия оседает на поверхности, образуя тонкую покровную пленку.

Получается как бы предварительная формовка алюминия. Поэтому, как правило, алюминиевая фольга, подвергшаяся газированию, значительно лучше формуется и дает конденсаторы со значительно более устойчивыми и лучшими характеристиками, чем обычная — негазированная.

Влияние газирования на формовку анодов и окончательные характеристики конденсаторов приведены в табл. 29 и 30.

Таблица 29

Пластина	Время формовки	Ток утечки в конце формовки, mA
Негазированная . .	4 ч. 44 м.	0,03
Газированная . . .	1 » 29 »	0,035

Видно, что удельная емкость газированной фольги получается несколько больше, чем негазированной. При малых плотностях формовочного тока время формовки газированной фольги меньше, чем негазированной, и окончательный ток утечки конденсаторов, имеющих аноды из газированной фольги, получается также меньше, чем в случае анодов из негазированной фольги.

Большая удельная емкость конденсаторов, аноды которых подвергались процессу газирования, указывает, что газирование продолжает процесс травления.

Таблица 30

Тип анода	Формовочное напряжение, V	Емкость, μF	Коэфициент мощности, %
Травленый негазированный	200	2,93	50
» газированный	200	3,54	70
Нетравленый негазированный	200	0,72	6
» газированный	200	0,75	6
Травленый газированный	475	1,1	12
» негазированный	475	0,91	85
Нетравленый негазированный	475	0,28	2,8
» газированный	475	0,31	3,3

Многие измерения показали, что процесс газирования значительно удлиняет срок службы конденсатора и положительно влияет на устойчивость оксидной пленки в период бездействия конденсаторов. Сейчас газирование широко внедряется в производство в виде третьей стадии промывки фольги после травления и производится следующим образом. Протравленную фольгу после двух промывок в теплой дестиллированной воде опускают в кипящую дестиллированную воду и с момента начала бурного выделения газа выдерживают 30 сек., после чего вынимают и сушат.

VII. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ И МЕТОДИКА ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Чтобы правильно применять электролитический конденсатор, необходимо знать его электрические свойства или, как принято говорить, его электрические характеристики. Для электролитических конденсаторов такими характеристиками являются: ток утечки, емкость, потери, рабочее и пиковое напряжения, а также пробивное и искровое напряжения.

Конденсаторы регулирующего типа характеризуются, кроме того, еще регулирующим напряжением.

1. РАБОЧЕЕ И ПИКОВОЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Рабочим напряжением электролитического конденсатора называется напряжение, которое прикладывается к конденсатору во время его работы в электрической цепи. При этом или более низком напряжении конденсатор должен длительно и нормально работать; это напряжение конденсатор легко выдерживает.

Как правило, электролитические конденсаторы работают или при постоянном напряжении или при пульсирующем напряжении.

Обычно напряжение переменной составляющей невелико и составляет от 0 до 10% общей величины напряжения, при котором работает конденсатор. В таком случае сумма переменного и постоянного напряжений не должна превышать рабочее напряжение кон-

денсатора, обозначенное на его этикетке. Вообще же, как правило, к электролитическому конденсатору не рекомендуется прикладывать большое напряжение переменной слагающей. Имея обычно большой коэфициент мощности, электролит и конденсаторы могут сильно разогреться и испортиться. Практика показывает, что напряжения переменной слагающей больше 10% общего напряжения допускать нельзя.

Пиковым называется то наибольшее напряжение, на которое конденсатор еще может быть включен, но при котором он не должен длительно работать. Если к конденсатору прикладывается не только постоянное, но и переменное напряжение, то под пиковым напряжением понимается сумма этих обоих напряжений.

Рабочее напряжение обычно составляет около 90% пикового. Если к конденсатору прикладывается, допустим, 6% напряжения переменного тока, то у конденсатора с пиковым напряжением 500 V рабочее напряжение может быть 450 V, из которых 423 V постоянного и 27 V переменного напряжения.

Кроме этих характерных напряжений, которые обычно обозначаются на этикетке конденсатора, часто измеряют еще пробойное и искровое напряжения. Под электрическим пробоем диэлектрика любого конденсатора понимается такое явление, когда диэлектрик под влиянием сильного электрического поля теряет свои изолирующие свойства и приобретает способность пропускать электрический ток. В месте пробоя диэлектрик разрушается, получается как бы короткое замыкание обкладок конденсатора и ток возрастает до очень большой величины. Пробитый конденсатор уже не годен к употреблению.

Напряжение, при котором возникает пробой диэлектрика конденсатора, называется пробивным напряжением. Пробивное напряжение для конденсаторов неэлектролитических является весьма важной характеристикой. Для конденсаторов же электролитических оно не имеет такого большого значения. Конденсаторы с жидким (водным) или с вязким (не водным) электролитом пробивного напряжения в указанном смысле вообще не имеют, так как из строя не выбывают. Это не значит, что у этого типа конденсаторов не бывает пробоя диэлектрика. Пробой диэлектрика существует и здесь, но он носит совсем другой характер и выражается в виде искрения на аноде. При искрении конденсатор издает характерный потрескивающий шум, который легко расслышать. У жидкостного конденсатора с открытой крышкой легко видеть мелкие мерцающие искорки, усеивающие весь анод. Это и есть пробой диэлектрика (оксидной пленки) конденсатора. Но этот пробой не выводит конденсатор из строя. При понижении напряжения конденсатор опять работает нормально. Он автоматически исправляет (заформовывает) пробитый диэлектрик, и это является большим преимуществом электролитических конденсаторов. Все же до искрового напряжения конденсатор доводить нельзя, так как в это время он сильно греется и возникает большое газообразование, что, как указывалось выше, может испортить конденсатор. В некоторых типах сухих электро-

литических конденсаторов, именно тех, у которых паста электролита очень сухая, могут быть пробиты не только оксидная пленка, но и обе обкладки конденсатора. Такой конденсатор к употреблению уже не пригоден.

2. ТОК УТЕЧКИ

Током утечки называется тот ток, который протекает через конденсатор при включении последнего под напряжение постоянного тока. Это определение относится не только к электролитическому, но и ко всякому другому типу конденсаторов. В идеальном случае конденсатор не должен вообще пропускать постоянный ток.

Но это было бы возможно только в том случае, если диэлектрик, находящийся между обкладками конденсатора, являлся бы абсолютным непроводником (изолятором). Однако абсолютных изоляторов не существует; каждое вещество хоть немного, но пропускает электрический ток. Величина этого тока в конденсаторе будет зависеть от удельного сопротивления диэлектрика. Удельное сопротивление диэлектриков, применяемых в электрических конденсаторах, как видно из табл. 31, очень велико и поэтому постоянный ток, протекающий через конденсатор, чрезвычайно мал.

Таблица 31

Наименование материалов	Удельное сопротивление, Ω
Парафин	$10^{16} \div 10^{18}$
Янтарь	$10^{19} \div 10^{20}$
Бумага	$10^{15} \div 10^{16}$
Слюда	10^{16}

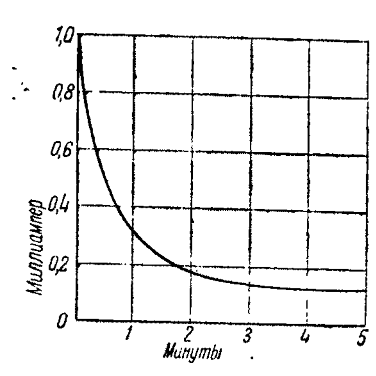
Природа тока утечки у электролитических конденсаторов несколько иная, чем у обычных конденсаторов. Здесь диэлектриком является слой окиси или гидроокиси алюминия (часто и того и другого вместе), который отложился в результате электролиза на алюминиевом аноде. Этот слой не является сплошным диэлектриком. Он весь пронизан очень тонкими порами, которые доходят до оголенного алюминия и заполнены соприкасающимся с ним электролитом. Эти поры закрываются оксидом только тогда, когда алюминий, покрытый пленкой, присоединяется к положительному полюсу источника тока, т. е. служит анодом. В другое время, когда конденсатор не включен под напряжение и находится в бездействии, или когда его оксидированная обкладка приключена к отрицательному полюсу источника тока, эти поры открыты и могут пропускать большой ток.

Поэтому ток утечки электролитического конденсатора не является постоянной величиной. Величина его очень сильно зависит от времени, которое протекло с момента включения конденсатора под напряжение, и становится постоянной только через некоторое время после включения. На фиг. 50 показано изменение в зависимости от времени тока утечки для электролитического конденсатора на 450 V рабочего напряжения, некоторое время находившегося в бездействии.

Видно, что в момент включения конденсатора ток утечки велик, а затем он быстро спадает, доходя через две минуты до постоянного значения.

Время от момента включения конденсатора под напряжение до того момента, когда ток утечки примет постоянное значение, идет, очевидно, на исправление диэлектрика конденсатора. В практике оно носит название времени подформовки.

Первоначальный «бросок» тока и время подформовки зависят от качества диэлектрика, от чистоты анодного алюминия и рабочего электролита, а также от времени бездействия конденсатора. Если диэлектрик конденсатора отформован плохо или анод выполнен из алюминия невысокого качества, или в электролит попали какие-либо загрязнения, ток утечки будет спадать очень медленно и остановится на довольно высоком значении. Большой ток утечки может сильно разогреть конденсатор и вообще вывести его из строя.



Фиг. 50. Зависимость изменения тока утечки от времени у электролитического конденсатора.

Таким образом «бросок» тока в момент включения конденсатора под напряжение и характер спадания этого тока со временем будут характеризовать степень поврежденности его диэлектрика.

Порча диэлектрика, особенно у конденсаторов жидкостного типа, происходит главным образом в период его бездействия с момента производства и до пуска его в работу. Долго не употреблявшийся конденсатор, даже при отсутствии в нем загрязнений, также может дать большой бросок тока, медленно спадающий со временем. Причиной этого часто является плохое качество заформовки диэлектрика анода и большое значение pH рабочего электролита.

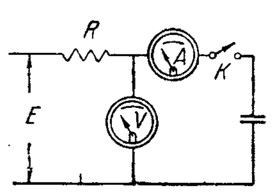
Комбинируя при формовке анода плотность тока, концентрацию и температуру формовочного электролита, а также время формовки, можно получить очень хорошую пленку, которая за время бездействия портится мало. Также установлено, что рабочий электролит с $pH = 4 \div 6$ мало влияет на расформовку конденсатора. Более высокое и более низкое значения pH будут постоянно растворять пленку.

Так как у всех конденсаторов от момента их изготовления до момента применения бывает период бездействия и, следовательно, они подвергаются некоторой порче, то перед использованием полагается испытывать их на степень расформовки.

Существуют два способа испытаний. Первый способ заключается в том, что конденсаторы просто оставляют на длительное время без нагрузки при комнатной температуре и через большие промежутки времени — день, неделя, месяц и больше — измеряют у них бросок

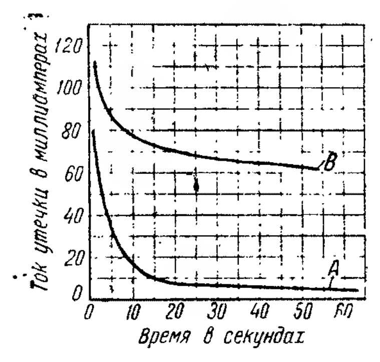
тока в момент включения и характер спадания его со временем. Этот метод неудобен тем, что он требует очень много времени.

Другой способ основан на принципе ускорения химических реакций при повышении температуры. Опытами установлено, что один час бездействия конденсатора при температуре 85° равноценен одному месяцу бездействия при комнатной температуре. Когда требуется быстро определить степень поврежденности партии конденсаторов за время бездействия, группу конденсаторов (обычно 1—2% партии) помещают в термостат, где выдерживают их без напряжения 3—4 часа при температуре 85°. После этого их вынимают, охлаждают до комнатной температуры и затем испытывают.



Фиг. 51. Схема измерения тока утечки.

Как в первом, так и во втором случае измерения производятся следующим образом. Конденсатор помещают в цепь по схеме, показанной на фиг. 51. Включив переключателем K напряжение постоянного тока и быстро установив его на величину пикового или рабочего напряжения конденсатора, на миллиамперметре A отсчитывают значение тока. Поддерживая по вольтметру все время установленное напряжение, производят такие отсчеты через каждые 15—30 сек. до тех пор, пока ток утечки будет иметь постоянное значение.



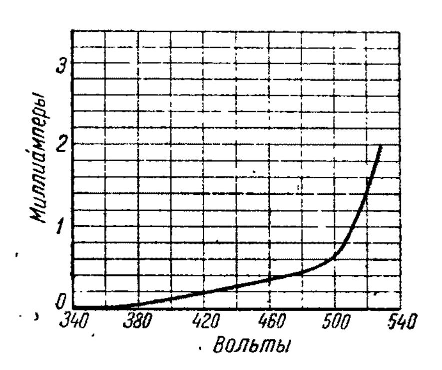
Фиг. 52. Зависимость тока утечки от времени у расформованных конденсаторов.

Сопротивление R включается в схему для того, чтобы в случае короткого замыкания конденсатора ограничить ток и тем самым предохранить от порчи миллиамперметр. На фиг. 52 показана зависимость токов утечки от времени у конденсаторов, имеющих нормальные (A) и ненормальные (B) степени порчи (расформовки).

При разбраковке конденсаторов по току утечки последний необходимо измерять только по истечении некоторого времени после включения конденсаторов под напряжение постоянного тока. Для этого обычно считается достаточным 5 мин. Но если известно, что конденсаторы находились очень долгое время в бездействии, это время следует увеличивать до 10—30 мин. Это главным образом относится к жидкостным конденсаторам, которые более подвержены расформовке. Для хороших сухих конденсаторов достаточно 1 мин., чтобы их ток утечки дошел до нормального и устойчивого значения.

Ток утечки электролитических конденсаторов необходимо измерять также при строго определенном напряжении. Это необходимо потому, что при различных напряжениях он будет иметь раз-

личные значения. На фиг. 53 и 54 показана зависимость тока утечки от приложенного напряжения для жидкостного и сухого электролитических конденсаторов на 8 μF и 500 V пикового напряжения. Видно, что чем выше приложенное напряжение, тем выше и ток утечки. До значения 500 V ток утечки почти прямолинейно зависит от напряжения, обнаруживая незначительный прирост при довольно большом изменении напряжения. По достижении 500 V кривая тока резко меняется. Достаточно уже небольшого изменения в приложенном напряжении, чтобы ток утечки сильно изменился. Эта часть кривой свидетельствует, что к конденсатору приложено напряжение, по величине приближающееся к формовочному напряжению диэлектрика.



Фиг. 53. Зависимость тока утечки от напряжения для мокрых конденсаторов на 8 μF и 500 V, от приложенного напряжения.

Миллиамперы
0,8
0,6
0,4
0,2
0
340 380 420 460 500 540
Вольты

Фиг. 54. Зависимость тока утечки от напряжения для сухого конденсатора на 8 μF и 500V.

При дальнейшем повышении напряжения будут проходить очень большие токи, которые могут снизиться только через некоторое время в результате дальнейшей заформовки анода. Однако такого повышения напряжения допускать нельзя, так как прежде чем произойдет дальнейшая заформовка, конденсатор испортится благодаря сильному разогреву.

Повышение напряжения выше пикового может также вызвать искрение на аноде или даже пробой конденсатора.

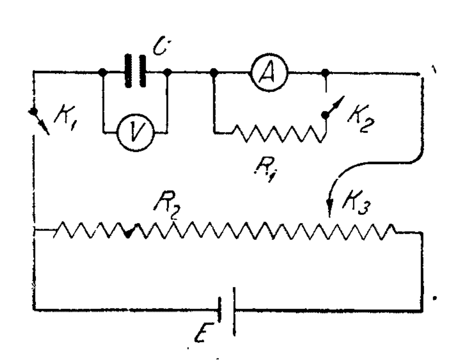
На какое напряжение нужно включать электролитический конденсатор перед измерением тока утечки (тренировать конденсатор) и при каком напряжении измерять его?

В этом отношении нет еще определенных установившихся правил. Американские и английские фирмы измеряют ток утечки сухих электролитических конденсаторов при пиковом напряжении. При этом же напряжении они тренируют конденсаторы перед измерением.

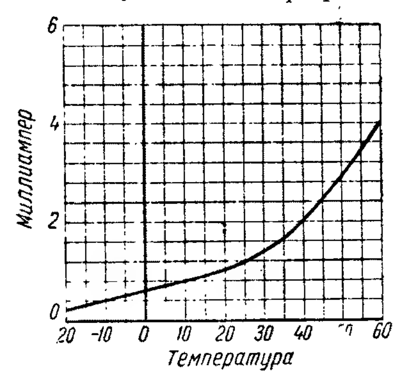
В СССР тренировку и измерение тока утечки ведут при рабочем напряжении. С жидкостными конденсаторами поступают несколько иначе. Тренировка их происходит при напряжении, несколько более высоком, чем то, при котором измеряется ток утечки. Так, например, у конденсатора на 415 V и 10 μF ток утечки измеряется при

405 V, а у конденсатора на 300 V и 16 μF он измеряется при 270 V. Первое считается максимально действующим напряжением, а второе — напряжением для измерения. В технических условиях на конденсаторы указывается точно, как производить указанные измерения. Правда, с техническими условиями может ознакомиться не всякий (особенно радиолюбитель), так как они обычно составляются и передаются только потребителям больших партий конденсаторов.

При отсутствии технических условий следует поступать следующим образом: тренировать конденсаторы при пиковом напряжении, а ток утечки измерять при рабочем. При таком измерении можно проверить, как конденсатор выдерживает пиковое напряжение, и в то же время точно знать, какой ток утечки он будет иметь при работе.



Фиг. 55. Схема установки для измерения тока утечки.



Фиг. 56. Зависимость тока утечки от температуры для сухого конденсатора на 8 μF и 500 V.

Ток утечки измеряется на соответствующей установке, состоящей из источника постоянного тока и измерительных приборов, собранных согласно схемы, показанной на фиг. 55. В качестве источника напряжения E применяют или аккумуляторы, или кенотронные выпрямители.

Аккумуляторы применяют редко и только для измерения низковольтных конденсаторов, так как для создания высоких напряжений потребовались бы очень громоздкие батареи аккумуляторов. Кенотронный же выпрямитель имеет малые размеры и в то же время может дать большие напряжения.

В зависимости от типов проверяемых конденсаторов в качестве измерительного прибора применяют миллиамперметр со шкалой на 15 или 1,5 mA. Измерительный прибор рекомендуется шунтировать подходящим сопротивлением R_1, чтобы предохранить прибор от порчи в случае большого первоначального броска тока. Обычно вполне достаточно, если сопротивление шунта равняется $\frac{1}{4}$ сопротивления прибора. Конденсатор включают под напряжение при зашунтированном приборе. По истечении установленного для тренировки времени шунт посредством ключа K_2 отключают и на приборе отсчитывают ток утечки в миллиамперах.

Требуемое напряжение на конденсаторе устанавливается передвиганием ползунка K_3 по реостату R_2 и отсчитывается на вольтметре V, включенном параллельно конденсатору C. Включают конденсатор под напряжение ключом K_1. Измеряют ток утечки обычно при комнатной температуре (18—20°). Однако при работе в установках конденсатор может находиться в различных температурных условиях. В большинстве случаев конденсаторы работают при температуре 15—40°, но в некоторых случаях им приходится работать при температуре от —30° до +60°. Поэтому важно знать, как изменяется ток утечки в зависимости от температуры. На фиг. 56 показана эта зависимость для сухого конденсатора на 8 μF и 500 V пикового напряжения. При одном и том же напряжении чем выше температура, тем выше ток утечки; с повышением температуры возрастает и скорость повышения тока утечки. Зависимость тока утечки от температуры объясняется тем, что при более высоких температурах более интенсивнее идет расформовка диэлектрика и поэтому требуются большие токи, чтобы его исправить.

Таблица 32

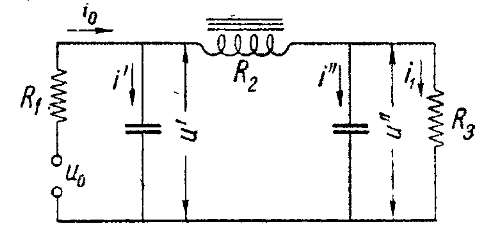
Рабочее напряжение, V	Емкость, μF	Ток утечки, mA
450	10	1,0
450	4	0,4
450	2	0,2
250	10	0,5
150	4	0,2
15	10	0,1
40	500	5,0
40	200	2,0
40	40	0,4
12	500	1,0
12	200	0,4

Токи утечки конденсаторов, изготовляемых на одинаковое рабочее напряжение, зависят от емкости конденсатора; чем выше емкость тем выше ток утечки. Точно так же конденсаторы, имеющие одну и ту же емкость, будут иметь тем больший ток утечки, чем выше рабочее напряжение. В табл. 32 показана зависимость тока утечки от рабочего напряжения и от емкости для конденсаторов, изготовляемых Воронежским заводом «Электросигнал».

3. РЕГУЛИРУЮЩИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

За последнее время способность электролитических конденсаторов резко увеличивать ток утечки с повышением напряжения используется в радиотехнике для ограничения выходного напряжения на фильтре выпрямителя.

В связи с этим появился особый тип так называемых регулирующих конденсаторов.



Фиг. 57. Схема фильтра выпрямителя.

Разберем схему фильтра выпрямителя нового типа приемника, в частности приемника 6Н-1, выпускаемого заводом «Электросигнал». На фиг. 57 буквами обозначены:

U_0 — напряжение, развиваемое выпрямителем;
U' — напряжение на первом конденсаторе фильтра;
U'' — напряжение на втором конденсаторе фильтра и на нагрузке (на приемнике);
R_1 — внутреннее сопротивление выпрямителя;
R_2 — активное (омическое) сопротивление дросселя;
R_3 — сопротивление приемника;
i_0 — общее значение постоянного тока, протекающего по цепи;
i' — ток утечки первого конденсатора фильтра;
i'' — ток утечки второго конденсатора фильтра;
i_1 — ток анодных цепей приемника.

Из этой схемы видно, что напряжение на первом конденсаторе фильтра выпрямителя будет определяться формулой:

$$U' = U_0 - R_1 i_0. \qquad (33)$$

Напряжение на втором конденсаторе фильтра, т. е. на выходе выпрямителя, а следовательно, на приемнике, определится формулой:

$$U'' = U' - R_2 (i'' + i_1). \qquad (34)$$

Подставив в формулу (34) значение U' из формулы (33) и приняв во внимание, что $i_0 = i' + i'' + i_1$, мы получим третью формулу, выражающую зависимость между напряжением, развиваемым выпрямителем U_0, рабочим напряжением приемника U'' и токами, проходящими по цепи (речь идет, конечно, о постоянных токах):

$$U'' = U_0 - R_1 (i' + i'' + i_1) - R_2 (i'' + i_1). \qquad (35)$$

Представим себе два случая. Первый — когда оба конденсатора фильтра имеют нулевое или очень малое значение тока утечки, и к тому же этот ток утечки мало меняется в зависимости от приложенного к конденсатору напряжения. Для электролитических конденсаторов такое состояние будет тогда, когда они работают при напряжениях, которые значительно ниже, чем их пиковые напряжения.

Пренебрегая в таком случае величинами i' и i'', получим следующее выражение для напряжения на выходе выпрямителя:

$$U'' = U_0 - i_1 (R_1 + R_2). \qquad (35')$$

Эта формула показывает, что в этом случае напряжение зависит только от величины тока, потребляемого приемником. Положение не изменится и в случае, если i' и i'' не равны нулю, но мало зависят от изменения напряжения, прикладываемого к конденсаторам. Тогда формула только примет вид:

$$U'' = U_0 - i_1 (R_1 + R_2) - K, \qquad (35'')$$

где K — постоянная величина, равная $- R_1 (i' + i'') - R_2 i''$. И в этом случае U'' опять-таки определяется величиной тока, потребляемого приемником.

Второй случай — когда $i_1 = 0$. Такое состояние будет тогда, когда приемник только что включен и его лампы с подогревным

накалом еще недостаточно прогрелись, а следовательно, анодная цепь приемника не потребляет тока.

В это время напряжение на выходе выпрямителя по величине мало отличается от напряжения, развиваемого выпрямителем U_0. По мере разогрева ламп, а следовательно и увеличения тока нагрузки, напряжение на выходе выпрямителя будет уменьшаться, пока не достигнет своего нормального рабочего значения.

Из сказанного ясно, что если ток утечки конденсаторов фильтра мало изменяется от напряжения, то всякий раз при включении приемника питающее его рабочее напряжение U'' будет изменяться от величины напряжения U_0, развиваемого выпрямителем без нагрузки (вхолостую), до величины его рабочего напряжения U'', когда приемник уже нормально работает; иначе говоря, всякий раз при включении приемник некоторое время будет испытывать перегрузку, находясь под напряжением, бо́льшим рабочего напряжения U''.

Величина этой перегрузки для приемника 6Н-1 приводится в табл. 33.

Таблица 33

Миллиамперы	0	1	17	26	33	41	47	57	65	70	77	85
Вольты	530	524	458	442	432	420,5	412	396	388	380	375	360

В графе «миллиамперы» этой таблицы указан ток в миллиамперах, который потребляет приемник в первые моменты после включения. В графе «вольты» приведено соответствующее потребляемому току напряжение в вольтах, измеренное на первом конденсаторе фильтра.

Видно, что в момент включения приемника, когда потребляемый им ток равен нулю, его детали будут испытывать перегрузку, приблизительно в 170 V, что составляет около 47% нормального рабочего напряжения на приемнике. Это довольно большая перегрузка, способная привести к нежелательным последствиям.

Если электрическая прочность деталей приемника при их изготовлении рассчитана на его рабочее напряжение, то в таком случае есть опасность их пробивания в момент включения или во время случайного повышения напряжения в городской сети, к которой подключен приемник.

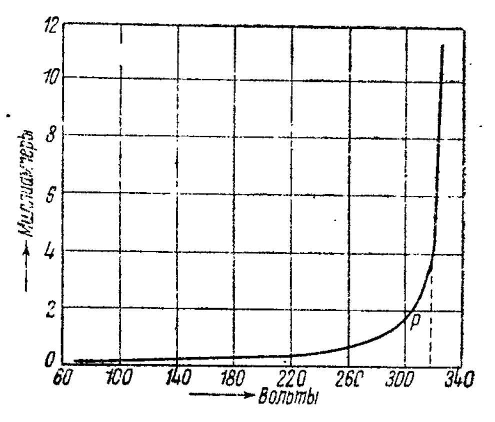
Пробивания можно избежать двумя путями — или увеличивать электрическую прочность деталей приемника, или ставить такой регулятор напряжения, который не позволил бы подняться напряжению выше заданного значения (рабочего).

Первый путь нежелателен потому, что он увеличил бы размеры приемника и значительно удорожил бы его стоимость.

Поэтому сейчас ставят регулятор напряжения и для регулировки используют свойство жидкостных электролитических конденсаторов повышать ток утечки при повышении приложенного напряжения.

Мы уже знаем, что при повышении напряжения на конденсаторе ток утечки сначала возрастает медленно, а затем, начиная с пикового напряжения, начнет резко увеличиваться уже при незначительном увеличении напряжения. Такой «вольт-амперной» характеристикой изменения тока утечки в зависимости от напряжения обладает любой электролитический конденсатор. Вообще говоря, можно любой из них использовать в качестве регулятора напряжения, если поставить его в качестве второго конденсатора фильтра. Если при этом пиковое напряжение конденсатора равно рабочему напряжению приемника, то всякое повышение напряжения в цепи фильтра выше пикового напряжения этого конденсатора (что было бы, например, в момент включения приемника в работу) вызывает в нем повышенный ток утечки, который устраняет возможность повышения напряжения U''.

А так как напряжение U'' на втором конденсаторе фильтра является одновременно и напряжением на приемнике, то детали последнего предохранены от перегрузки.



Фиг. 58. Зависимость тока утечки от напряжения у регулирующего конденсатора.

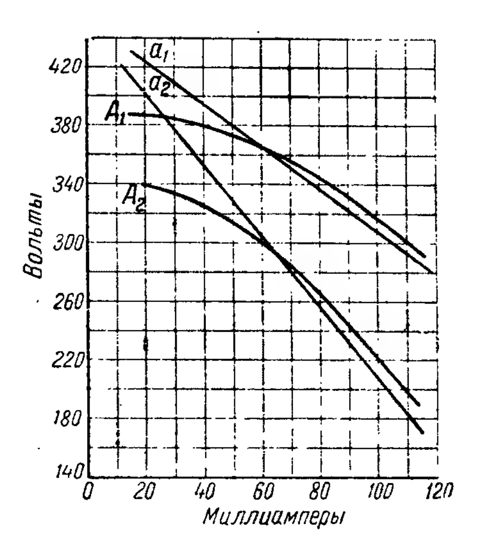
Однако не всякий жидкостный конденсатор можно использовать в качестве такого регулятора. Уже при определении пикового напряжения было указано, что при этом напряжении конденсатор может работать только короткое время, так как при длительной работе из-за большого тока утечки он может разогреться и испортиться. Кроме того, значительная перегрузка выше пикового значения у обычного электролитического конденсатора вызовет искрение на аноде. Но искрение нежелательно, так как оно может привести к еще более быстрому разогреванию конденсатора, к коррозии анода и тому подобным нежелательным явлениям. Следовательно, конденсатор, регулирующий напряжение, должен иметь такую вольт-амперную характеристику, чтобы при некотором превышении приложенного напряжения над его рабочим напряжением его ток утечки резко возрастал. Одновременно при этом на аноде не должно наблюдаться заметного искрения. При некоторых условиях такую характеристику оказалось возможным подобрать для жидкостного электролитического конденсатора.

Как показали лабораторные исследования, такая характеристика осуществима, если напряжение формовки диэлектрика конденсатора лежит ниже искрового потенциала рабочего электролита, и pH рабочего электролита при этом будет около 7. Комбинируя соответствующим образом состав рабочего электролита и напряже-

ние формовки, можно подобрать любую нужную вольт-амперную характеристику конденсатора.

На фиг. 58 приведена характеристика такого конденсатора на 300 V рабочего напряжения емкостью в 16 μF. Как видно, уже незначительное превышение рабочего напряжения у этого конденсатора сильно увеличивает ток утечки. Практически на этом конденсаторе уже нельзя поднять напряжение выше 330—340 V, причем заметного искрения при этом не наблюдается.

Если применить такой конденсатор в качестве второго конденсатора (выходного) в фильтре выпрямителя, заранее подобрав его вольт-амперную характеристику таким образом, чтобы точка перегиба P на вольт-амперной кривой (фиг. 58) не на много превышала рабочее напряжение приемника и конденсатора, то конденсатор будет регулировать развиваемое выпрямителем напряжение. Увеличение собственного тока утечки конденсатора не позволит напряжению на приемнике подняться выше заданной величины.



Фиг. 59. Зависимость напряжения на приемнике от нагрузки с регулирующим и без регулирующего конденсатора.

Такой конденсатор называют регулирующим конденсатором, а напряжение, соответствующее точке P на его вольт-амперной характеристике — регулирующим напряжением.

В практике вольт-амперную характеристику регулирующего конденсатора подбирают таким образом, чтобы в формуле (34) сумма токов $i'' + i'$ являлась бы величиной, приблизительно постоянной.

На фиг. 59 построены кривые, характеризующие изменение напряжения питания приемника 6Н-1 в зависимости от нагрузки. Вторым конденсатором фильтра в одном случае (A_1 и A_2) являлся регулирующий, а в другом (a_1 и a_2) — нерегулирующий конденсатор.

Кривая A_1 характеризует изменение напряжения на первом конденсаторе, а кривая A_2 — на втором конденсаторе фильтра; при этом второй конденсатор является регулирующим; кривые a_1 и a_2 показывают соответственно изменения напряжения на первом и втором конденсаторах фильтра, когда второй конденсатор являлся нерегулирующим.

Характер течения кривых показывает, что при наличии в фильтре регулирующего конденсатора напряжение не могло подняться выше некоторой определенной величины, в то время как при отсутствии регулирующего конденсатора при уменьшении нагрузки (потребляемого приемником тока) напряжение все время возрастало.

Из сказанного ясно, что для этого типа конденсаторов регулирующее напряжение является очень важной характеристикой. Поэтому у них, наряду с током утечки, проверяется также и регулирующее напряжение, которое измеряют следующим образом. Включают конденсатор в уже ранее описанную установку для измерения тока утечки (фиг. 55) и выдерживают его минут пять при рабочем напряжении. Затем передвижением ползунка реостата поднимают напряжение на конденсаторе до тех пор, пока стрелка вольтметра перестанет заметно отклоняться. При этом прислушиваются, нет ли характерного для искрения потрескивания в конденсаторе. Вольтметр при этом покажет регулирующее напряжение измеряемого конденсатора. На ток утечки в данном случае не обращают внимания. Конечно, такое измерение можно производить только в том случае, если мощность источника тока по своей величине соответствует мощности обычного выпрямителя приемника.

Часто в промышленной практике регулирующее напряжение измеряют при заданном токе утечки. Величина тока утечки устанавливается при расчете приемника, в котором будот работать данный конденсатор, и должна быть достаточной, чтобы при таком его значении приемник не испытывал перегрузки.

Как на пример укажем на приемник 6Н-1. В качестве регулятора напряжения вторым конденсатором фильтра выпрямителя в нем используется жидкостный электролитический конденсатор на 300 V рабочего напряжения емкостью 16 μF. Расчет приемника требует, чтобы регулирующий конденсатор при нагрузке в 360 V пропускал ток в 65 mA. Иными словами, выпрямитель развивает такую мощность, что при токе утечки регулирующего конденсатора в 65 mA напряжение на нем будет не больше 360 V. В данном случае 360 V и будут являться регулирующим напряжением, а 65 mA — это тот ток i'' в формуле (34), который компенсирует ток, потребляемый приемником в момент его включения, т. е. когда $i' = 0$.

На практике такое соотношение между током утечки и регулирующим напряжением редко выдерживается. Многие измерения показали, что ток утечки в 65 mA часто достигается уже при напряжении от 320 до 340 V. Выдержать строго расчетные соотношения между током и напряжением при изготовлении конденсаторов очень трудно и отклонения неизбежны. Как видно из приведенных примеров, стараются, чтобы эти отклонения шли в сторону не увеличения, а уменьшения регулирующего напряжения. В таком случае имеется большая гарантия непробиваемости приемника. Заниженное регулирующее напряжение оправдывается еще тем, что оно постепенно, правда очень медленно, возрастает.

Если задан ток утечки при перегрузке, измерение регулирующего напряжения производят следующим образом. После соответствующей выдержки под рабочим напряжением, как и в первом случае, напряжение на конденсаторе поднимают до тех пор, пока стрелка амперметра не покажет обусловленный техническими условиями ток утечки при перегрузке (в данном случае 65 mA). После того как ток утечки

достиг указанного значения, на вольтметре отсчитывают напряжение в вольтах, которое и принимается за регулирующее.

И в первом и во втором случае измеряется, конечно, одна и та же величина, но последний метод более определенный, так как он контролирует именно то напряжение, которое достаточно, чтобы вызвать необходимый ток утечки, компенсирующий в момент подогрева ламп ток i_1, потребляемый приемником при нормальной его работе.

Из разобранных примеров видно, что во время регулирования напряжения через конденсатор проходит довольно значительный ток. К тому же благодаря процессу электролиза в нем будет в это время выделяться много газа, ибо электролитический конденсатор представляет собой электролитическую ячейку. Выделяющийся газ, правда, не представляет особой опасности, так как в конструкции конденсатора предусмотрен клапан, дающий возможность газам выходить наружу. Однако ток, выделяющий джоулево тепло, будет разогревать конденсатор. Поэтому включать его на это напряжение можно только на короткое время, так как в противном случае он может очень сильно разогреться и испортиться.

В приемнике конденсатор находится под регулирующим напряжением все то время, пока разогреваются лампы с подогревным накалом. Это время длится приблизительно полминуты. Благодаря значительному объему электролита за такое короткое время конденсатор не успевает нагреться и поэтому перегрузка в течение такого короткого времени на его дальнейшей работе не сказывается.

4. ЕМКОСТЬ

У электролитических конденсаторов следует различать два вида емкости — номинальную и фактическую. Номинальная емкость обозначается на этикетке конденсатора. Это предположительная емкость, которая задается при изготовлении конденсаторов. Фактическая же емкость это та, которая получается при испытании каждого экземпляра конденсатора, иначе говоря, действительная его емкость.

Фактическая емкость почти всегда отличается от емкости номинальной. Чаще всего фактическая емкость превышает номинальную; реже она бывает ниже ее. В большинстве случаев отклонение емкости колеблется в пределах от —10% до +70%; иначе говоря, в партии конденсаторов с номинальной емкостью 10 μF мы всегда можем встретить конденсаторы, имеющие действительную емкость в 9 и 17 μF. Такие сравнительно большие допуски объясняются чрезвычайной трудностью изготовления конденсаторов с одинаковой емкостью.

Не говоря уже о том, что очень трудно, особенно в условиях статической формовки, получить одинаковой толщины оксидную пленку, на величине емкости электролитического конденсатора в сильной мере сказываются условия приготовления рабочего электролита и качество бумажной прокладки. Если анодная фольга подвергается предварительной протравке, то в очень сильной мере сказывается и неравномерность протравки анода.

В дальнейшем, при рассмотрении емкости электролитических конденсаторов, мы будем иметь дело только с фактической емкостью и будем ее называть просто емкостью.

Емкость электролитического конденсатора, как уже было упомянуто выше, определяется размером анодной пластины и толщиной оксидного слоя. Так как толщина оксидного слоя зависит от формовочного напряжения, то в формулу емкости входит еще формовочное напряжение.

Формула емкости электролитического конденсатора имеет следующий вид:

$$C = \frac{12{,}56q'}{U_ф} \text{ микрофарад.} \qquad (25')$$

Это — статическая емкость электролитического конденсатора, и она по определению должна оставаться неизменной при любых условиях, пока остаются неизменными толщина диэлектрика (оксидного слоя) и размер анода.

У электролитического конденсатора эту емкость трудно измерить, и поэтому, вообще говоря, в практике эксплоатации конденсаторов мы имеем дело с эффективной емкостью, которую нам показывает конденсатор при данном методе его измерения. Эффективная емкость, с которой собственно в практике и встречаются, является величиной непостоянной и зависит от многих причин.

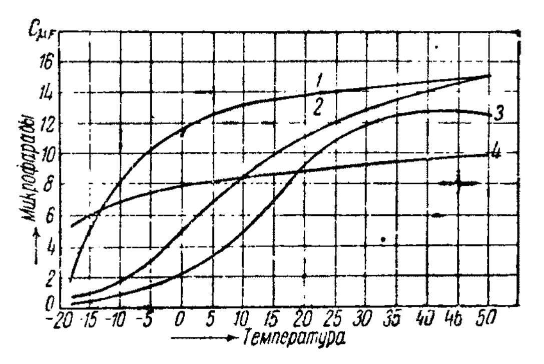
Основными факторами, влияющими на величину эффективной емкости, являются окружающая температура и частота переменного тока.

Зависимость емкости от окружающей температуры. Емкость электролитических конденсаторов при понижении окружающей температуры уменьшается, а при ее увеличении увеличивается. Однако изменение емкости с температурой различно для конденсаторов, изготовленных с различным рабочим электролитом. На фиг. 60 показано изменение емкости в зависимости от температуры для конденсаторов на 450 V с номинальной емкостью 10 μ F. Рабочим электролитом в этих конденсаторах был раствор борной кислоты и аммиака в глицерине. Рабочие электролиты разнились только концентрациями и температурами варки.

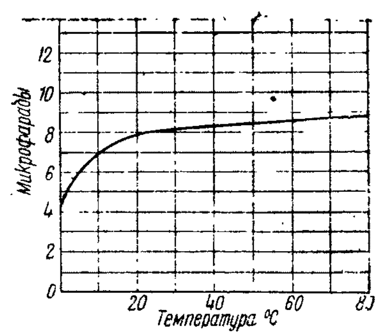
Обозначим эти электролиты *1*, *2* и *3*. Если принять емкость этих конденсаторов при температуре 50° за 100%, то конденсаторы потеряли 50% емкости с электролитом *1* при температуре —11,5°, с электролитом *2* при температуре +7°, а с электролитом *3* уже при температуре +14°. Кривая *4* на фиг. 60 показывает зависимость емкости от температуры для конденсаторов с этиленгликолевым рабочим электролитом. Емкость его снизилась на 50% только при температуре —20°. Жидкостные конденсаторы с водным электролитом (фиг. 61), как правило, до температуры 0° мало изменяют свою емкость. Однако около 0° емкость их резко обрывается и падает практически до нуля.

Разобранные примеры показывают, что при использовании элек-

тролитических конденсаторов недостаточно знать номинальную их емкость, необходимо еще знать, в каком температурном режиме будут они работать и характер изменения емкости этих конденсаторов от температуры.

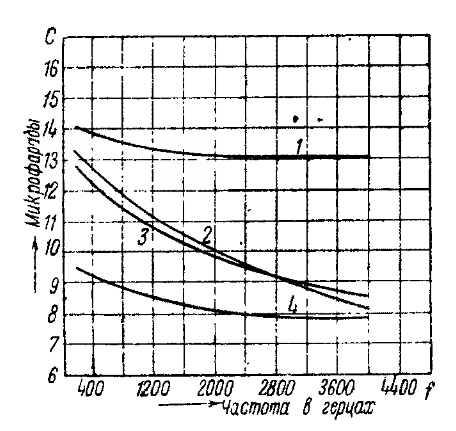


Фиг. 60. Зависимость емкости сухих электролитических конденсаторов от температуры.



Фиг. 61. Зависимость емкости мокрых электролитических конденсаторов от температуры.

Зависимость емкости от частоты. Емкость электролитических конденсаторов зависит и от частоты переменного тока: чем выше частота переменного тока, протекающего через конденсатор, тем ниже емкость. Характер изменения емкости от частоты зависит от состава рабочего электролита. На фиг. 62 показан характер зависимости ёмкости от частоты для конденсаторов с различным составом рабочего электролита. Это те же конденсаторы, которые уже мы рассматривали в связи с зависимостью емкости от температуры. Цифры, поставленные над кривыми, относятся к тем же самым электролитам. Емкость у конденсаторов с электролитами *1* и *4* мало зависит от частоты, а у конденсаторов с электролитами *2* и *3* емкость изменяется с частотой значительно.



Фиг. 62. Зависимость емкости электролитических конденсаторов от частоты.

Приведенные факты показывают, что изменение емкости с частотой переменного тока и температурой зависит от одной и той же причины, которая кроется в свойствах рабочего электролита. Однако причины изменения емкости конденсаторов мы разберем несколько ниже. Сейчас же необходимо рассмотреть еще одну величину, характеризующую электролитический конденсатор,— его потери.

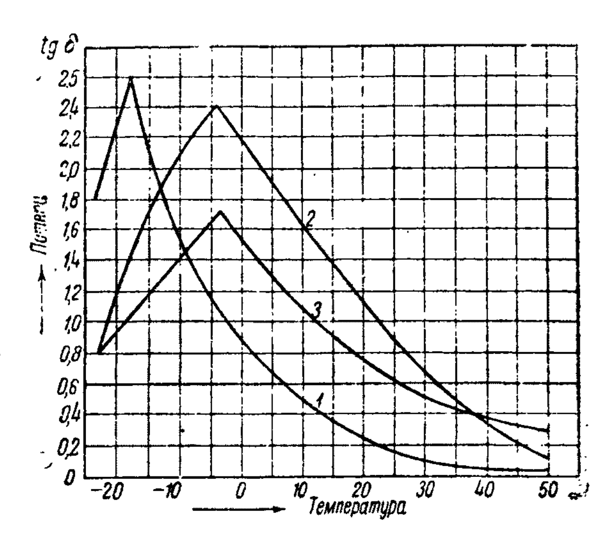
5. ПОТЕРИ

В разделе «Электрические конденсаторы» уже было выяснено, что потери электрической энергии в конденсаторе при включении его в сеть переменного тока характеризуются коэфициентом мощности, так называемым $\cos\varphi$, т. е. отношением активной составляющей тока к полному току, проходящему через конденсатор. Часто их еще выражают через тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$, т. е. отношением активной составляющей тока в конденсаторе к его реактивной составляющей.

В СССР потери выражают обычно через $\operatorname{tg}\delta$, который можно вычислить, как произведение емкости на последовательно включенное к ней сопротивление и частоту переменного тока, проходящего через конденсатор. В этом случае конденсатор можно представить в виде схемы замещения, как показано на фиг. 17,*а*; если *C*—идеальная емкость без потерь, а *R* — последовательно включенное к ней эквивалентное сопротивление, то тангенс угла потерь выразится формулой:

$$\operatorname{tg}\delta = CR\omega, \quad (23)$$

где ω — частота.



Фиг. 63. Зависимость потерь от температуры.

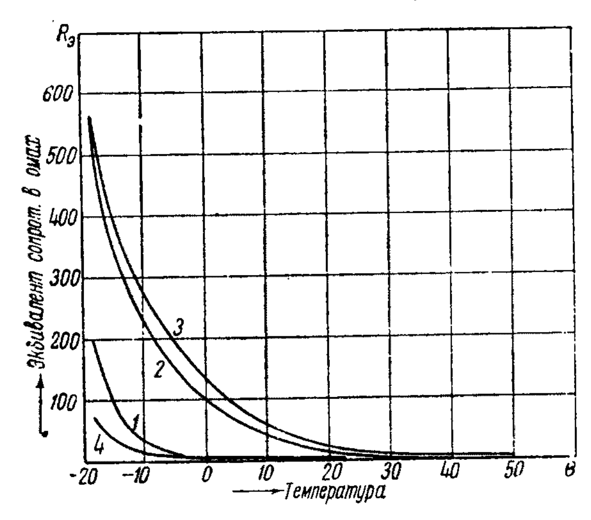
Зависимость потерь от окружающей температуры. Так как емкость зависит от температуры, то и $\operatorname{tg}\delta$ также должен зависеть от температуры. На фиг. 63 представлено изменение тангенса угла потерь в зависимости от окружающей температуры для конденсаторов, уже ранее приводившихся при показе зависимости емкости от температуры и частоты (см. фиг. 60 и 62). Номера электролитов и в данном случае те же.

На первый взгляд казалось бы, что если при уменьшении температуры емкость падает, то и $\operatorname{tg}\delta$ должен бы снизиться. Однако он не снижается вместе с емкостью, а, наоборот, возрастает. Это объясняется тем, что со снижением температуры *R* возрастает значительно быстрее, чем падает емкость.

На фиг. 64 показаны результаты испытания тех же четырех конденсаторов, характеризующие изменение последовательного эквивалентного сопротивления *R* с температурой.

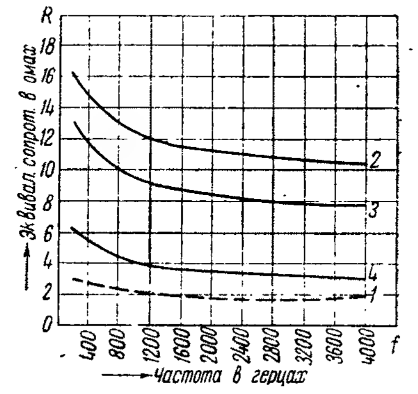
С понижением температуры $\operatorname{tg}\delta$ растет не все время. По достижении некоторого максимального значения $\operatorname{tg}\delta$ начинает снижаться.

Если мы сравним протекание кривых на фиг. 60 и фиг. 63, то заметим, что ниспадающая часть кривой tg δ совпадает с наиболее крутым падением емкости. При данной температуре следует отметить, что характер изменения tg δ и R с температурой тоже в сильной степени зависит от состава электролита.



Фиг. 64. Зависимость R от температуры.

Зависимость потерь от частоты. Последовательное эквивалентное сопротивление потерь R зависит от частоты точно так же, как и емкость. С увеличением частоты R уменьшается (фиг. 65). Характер изменения R с частотой при данном электролите показывает, что емкость электролитического конденсатора и последовательное эквивалентное сопротивление потерь взаимно между собой как-то связаны и что причины этой связи опять-таки лежат в свойствах рабочего электролита.



Фиг. 65. Зависимость R от частоты.

Таким образом установлено, что емкость и последовательное эквивалентное сопротивление, а благодаря им и потери электролитических конденсаторов, в очень сильной степени зависят от условий, в каких работает конденсатор. Эти характеристики не остаются постоянными, а меняются при изменении окружающей конденсатор температуры и частоты протекающего через него переменного тока.

6. ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОЛИТА НА РАБОТУ КОНДЕНСАТОРА

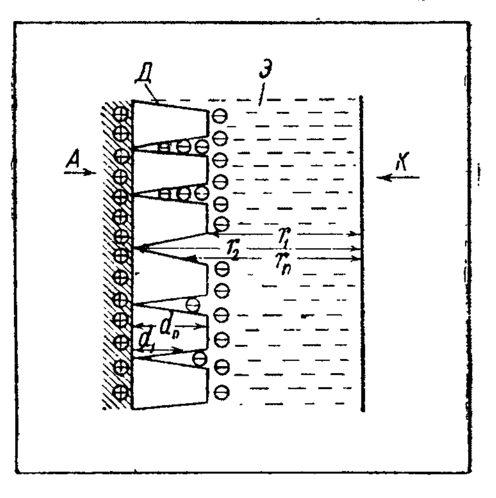
Для выяснения вопроса о зависимости характеристик электролитических конденсаторов от температуры и частоты разберем схематический разрез электролитического конденсатора, представленный на фиг. 66.

Буквами здесь обозначены: *А* — анодная алюминиевая пластина, служащая одной из обкладок конденсатора, на которой нанесен оксидный слой диэлектрика *Д*; *Э* — электролит, который является

второй обкладкой конденсатора; K — катодная алюминиевая фольга, подводящая ток к электролиту.

Диэлектрик конденсатора (оксид) не является плотным монолитным слоем, а наоборот, пронизан порами, которые также заполнены электролитом.

У заряженного конденсатора электрические заряды располагаются по обе стороны диэлектрика, как это показано на фиг. 66. Со стороны электролита носителями электрических зарядов являются анионы электролита. При зарядке конденсатора эти анионы проходят путь от катодной пластины до оксидного слоя через электролит, который представляет некоторое омическое сопротивление электрическому току (анионам).



Фиг. 66. Схематическое изображение разреза заряженного электролитического конденсатора.

Так как слой диэлектрика пористый, то этот путь, а следовательно и сопротивление, для различных участков будет различен. В участке пор этот путь будет длиннее, а в участке выпуклостей — короче. Соответственно и сопротивление электрическому току в первом случае будет больше, а во втором меньше. Нужно иметь еще в виду, что сопротивление электролита в порах благодаря их узости будет несколько больше, чем вне пор.

Пусть имеется n этих элементарных участков. Обозначим сопротивления электролита, прилегающего к этим отдельным участкам, через r_1, r_2,... r_n. Все эти сопротивления включены параллельно друг к другу. Измеряемое нами последовательно эквивалентное сопротивление R является суммой этих отдельных, параллельно включенных сопротивлений:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n}. \qquad (36)$$

Величина этого сопротивления, как видно из формулы, зависит от величины этих элементарных сопротивлений. Если элементарные сопротивления уменьшаются, то будет уменьшаться и общее сопротивление электролита.

Толщина слоя оксида, как видно из фиг. 66, также не везде одинакова. В порах она меньше, а в выпуклости больше. Обозначим толщины отдельных участочков диэлектрика через d_1, d_2,... d_n. Так как емкость зависит от толщины слоя диэлектрика, то емкость участочка поры будет больше, чем такого же участочка на выпуклости. Но мы измерим общую суммарную емкость конденсатора, сложенную

из параллельно включенных емкостей отдельных участочков. Величину этой емкости математически можно представить так:

$$C = \frac{\varepsilon q_1}{4\pi d_1} + \frac{\varepsilon q_2}{4\pi d_2} + \ldots + \frac{\varepsilon q_n}{4\pi d_n}. \qquad (37)$$

Формула (37) показывает, что величина емкости конденсатора зависит от емкости отдельных участков: чем меньше емкость элементарных участков анодной пластины, тем меньше емкость конденсатора. А емкость элементарных участков в свою очередь зависит от того, на каком расстоянии друг от друга расположены в этих участках положительные и отрицательные заряды.

Будем измерять емкость и последовательное сопротивление R конденсатора при различных частотах переменного или пульсирующего прямого тока. Если частота достаточно мала, то все анионы полностью успевают доходить во всех участках вплоть до оксидного слоя. Мы получим тогда наибольшую эффективную емкость C_m и наибольшее эффективное сопротивление R_m. При увеличении частоты все меньше и меньше анионов успевает проникать вглубь пор; в отдельных участках они не будут даже доходить до оксидного слоя. Заряды в этих участках, следовательно, в это время будут располагаться на большем расстоянии друг от друга, чем толщина оксида. В этих местах толщина слоя d как бы увеличится и поэтому емкость этих участков уменьшится. Но так как емкость конденсатора складывается из емкостей этих элементарных участков, то мы будем наблюдать у м е н ь ш е н и е е м к о с т и конденсатора с у в е л и ч е н и е м ч а с т о т ы т о к а.

Не успевая проникнуть в поры, анионы в отдельных участках будут проходить, очевидно, меньший путь и преодолеют, следовательно, меньшее сопротивление. А так как общее сопротивление электролита складывается из параллельно включенных сопротивлений отдельных участков, то с ростом частоты, следовательно, также будет уменьшаться сопротивление потерь R. Таким образом становится понятным, почему емкость и сопротивление электролитического конденсатора уменьшаются с частотой тока.

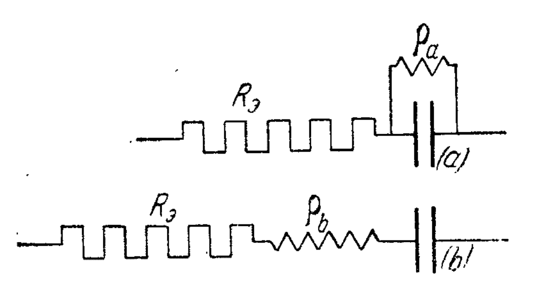
Разберем теперь, как влияет температура.

Известно, что с увеличением температуры увеличивается электролитическая диссоциация и уменьшается вязкость электролита; с понижением температуры, наоборот, диссоциация уменьшается, а вязкость электролита увеличивается. Чем больше вязкость электролита, тем труднее ионам передвигаться, и наоборот. В свою очередь, чем больше степень диссоциации, тем больше количество анионов будет участвовать в передвижении. Понятно, что все это непосредственно сказывается на электропроводности электролита. Чем выше температура, тем больше электропроводность и, наоборот, чем температура ниже, тем электропроводность электролита меньше, а следовательно больше его сопротивление.

Будем теперь измерять емкость и последовательное сопротивление конденсатора, изменяя его температуру.

При уменьшении температуры удельное сопротивление электролита будет возрастать и последовательное сопротивление потерь конденсатора будет увеличиваться. Вследствие повышенного сопротивления электролита ионам будет труднее проникать к оксидному слою диэлектрика, особенно в его поры и поэтому эффективная емкость будет уменьшаться. Наоборот, увеличение удельной электропроводности в результате повышения температуры даст возможность анионам глубже проникать в поры и тем самым увеличивать эффективную емкость конденсатора.

Если мы охладим конденсатор так, что его электролит замерзнет (для жидкостных конденсаторов это наступает уже при температуре около нуля), то конденсатор практически потеряет емкость, так как расстояние между его обкладками увеличится до расстояния между анодной и катодной пластинами. Этим и можно объяснить, почему изменение состава рабочего электролита так сильно влияет на электрические характеристики конденсаторов.



Фиг. 67. Схемы замещения электролитического конденсатора.

Изменяя состав электролита, мы меняем и его физико-химические свойства — вязкость, концентрацию ионов, электропроводность, а также характер изменения их от температуры. Между тем эти свойства сказываются на подвижности анионов, от которой собственно и зависят многие качества электролитических конденсаторов.

В разделе об электрических конденсаторах указывалось, что всякий реальный конденсатор (неэлектролитический) с потерями можно представить в виде двух схем замещения: параллельной и последовательной (см. фиг. 17). Эти потери, вообще говоря, вызываются несовершенством диэлектрика или конструктивными недостатками конденсатора. Диэлектрик электролитического конденсатора также не является совершенным изолятором. Поэтому причины, обусловливающие потери в диэлектрике для обычных конденсаторов, присущи и электролитическому конденсатору, и для него также можно принять указанные схемы замещения.

Однако у электролитического конденсатора, кроме потерь в самом диэлектрике, существуют еще потери в электролите, обусловливаемые его омическим сопротивлением, действительно включенным последовательно с емкостью. Принимая это во внимание, мы должны схемы замещения электролитического конденсатора построить так, как указано на фиг. 67,*a* и *b*.

В соответствии со схемой 67, *b* для выражения потерь можно написать формулу:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C R_э + \omega C \rho, \tag{38}$$

где $R_э$ — сопротивление электролита, а ρ — эквивалентное сопротивление, обусловливающие потери в диэлектрике (пленке) конденсатора.

Если удельное сопротивление электролита и расстояние между анодной пластинкой и катодом конденсатора малы, то потери обусловливаются главным образом потерями в самом диэлектрике. Если же электролит вязок или температура понижена, то возрастает удельное сопротивление электролита и потери будут обусловливаться главным образом его величиной.

По подсчетам Гюнтершульце для алюминия величина $\omega C\rho$ составляет приблизительно около 0,03 при частоте 50 Hz. Хорошие электролитические конденсаторы имеют на этой частоте $\omega C\rho$ от 0,05 до 0,1.

7. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ И ПОТЕРЬ

Существует много методов измерения характеристик электролитических конденсаторов. Вообще можно сказать, что все методы измерения других электрических конденсаторов применимы и для конденсаторов электролитических. Однако есть особенности, которые заставляют несколько видоизменить обычную методику.

Прежде всего надо помнить, что электролитические конденсаторы полярны, т. е. что они предназначены для работы только при постоянном или пульсирующем прямом токе. Поэтому при всяких измерениях необходимо эту полярность сохранять, в противном случае могут получиться неточные результаты. Так как в большинстве своем конденсаторы измеряют, применяя переменный ток, то для того, чтобы не нарушалась их полярность, необходимо к конденсаторам прикладывать извне одновременно и постоянное поляризующее напряжение.

Постоянное поляризующее напряжение всегда надо выбирать таким образом, чтобы оно не превышало величины амплитудного значения переменного напряжения. В практике обычно величина постоянного поляризующего напряжения составляет приблизительно 90% общего напряжения. В то же время нужно следить за тем (особенно это относится к низковольтным конденсаторам), чтобы общая сумма постоянного и переменного напряжений не превышала пикового напряжения конденсатора. В противном случае через конденсатор будут проходить очень большие токи утечки и потери получатся преувеличенные.

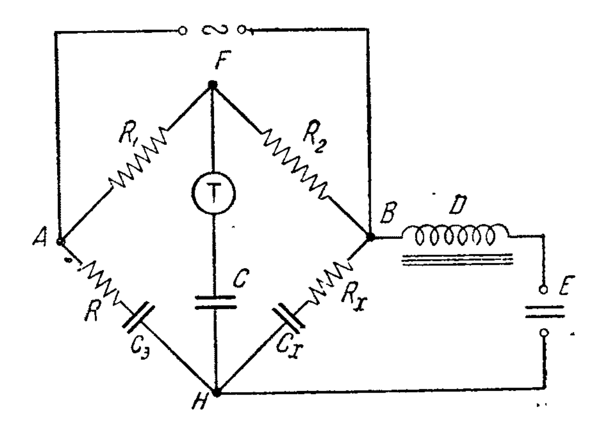
Вторая особенность, которую надо учесть при измерении, заключается в том, что электролитические конденсаторы, как правило, имеют большую емкость, иногда доходящую до 10 000 μF и больше. При мостовых методах измерения таких емкостей очень трудно подобрать достаточную по величине эталонную емкость. Поэтому иногда приходится отказываться от точных мостовых методов измерения и применять менее точные методы вольтметра-амперметра.

Перед измерением конденсаторы, как правило, небходимо подвергать на некоторое время (от 5 до 30 мин., в зависимости от времени бездействия) тренировке при рабочем или пиковом напряжении.

У нетренированного конденсатора, как уже говорилось раньше, ток утечки намного выше нормального.

Измерения на мостах. Измерения емкости и потерь конденсаторов с достаточной точностью производятся на мостах с применением переменного тока. При этом в схеме моста измеряемый электролитический конденсатор сравнивается с эталонным конденсатором (известной емкости).

Схема такого моста представлена на фиг. 68. Мост состоит из четырех плеч, два из которых R_1 и R_2 представляют чисто активные сопротивления. Чтобы можно было менять величину сопротивления этих плеч, в качестве R_1 и R_2 удобно применять декадные магазины сопротивлений. Два других плеча представляют собой емкости, одна из которых C_x — измеряемый электролитический конденсатор, а другая $C_э$ — эталонный конденсатор (известной емкости). Эталонным конденсатором обычно служит декадный магазин емкостей.



Фиг. 68. Схема моста для измерения емкости электролитических конденсаторов.

Чтобы при измерении компенсировать потери в электролитическом конденсаторе, которые, как уже было выяснено, обусловливаются сопротивлением электролита, последовательно с эталонным конденсатором включается также переменное эталонное сопротивление. В качестве последнего берется точный декадный магазин сопротивлений.

Для поляризации электролитического конденсатора к нему подводят постоянное напряжение. В качестве источника поляризующего напряжения можно применять или аккумулятор, или кенотронный выпрямитель. Между источником поляризующего напряжения и мостом ставится дроссель D. Не препятствуя прохождению прямого тока, дроссель должен иметь достаточно большое реактивное сопротивление переменному току, чтобы воспрепятствовать его сколько-нибудь заметному прохождению в цепь источника прямого тока. В противном случае, так как источник постоянного тока имеет некоторую емкость, эта емкость сложится с емкостью измеряемого конденсатора, и для последней получатся завышенные данные. По некоторым исследованиям коэфициент самоиндукции дросселя должен быть не менее 1000 Н. Дроссели с меньшим коэфициентом самоиндукции и без специальных мер против внутренней емкости обмоток искажают результаты измерений.

В диагональ моста в точках F и H в качестве нулевого инструмента включается телефон T. Телефон применяется в том случае, когда частота переменного тока, подающегося на мост, является звуковой.

В телефоне достаточно хорошо слышна частота в пределах 200—6000 периодов в секунду.

За этими пределами измерять достаточно точно частоту при помощи телефона уже трудно. Когда требуется измерять конденсаторы при более высоких или более низких частотах, иногда вместо телефона включаются гальванометр с выпрямителем.

Между телефоном и остальной частью моста включается бумажный конденсатор C, для того чтобы не дать возможность источнику постоянного тока замкнуться через телефон. Величина емкости этого конденсатора должна быть достаточной, чтобы свободно пропускать переменный ток. В точках A и B к мосту подводится переменное напряжение.

Измерения производят следующим образом.

Подключают к мосту сначала измеряемый конденсатор и включают поляризующее напряжение. Затем, в соответствии с измеряемой емкостью, устанавливают соотношение плеч R_1 и R_2. Наиболее точные результаты получаются тогда, когда отношение плеч $\frac{R_1}{R_2}$ лежит в пределах от 0,1 до 10; самые точные — когда $\frac{R_1}{R_2} = 1$.

После этого включают переменное напряжение и, слушая в телефон, подбирают емкость $C_э$ и сопротивление R до тех пор, пока в телефоне не будет больше слышно звука или по крайней мере звучание станет минимальным. В таком случае плечи моста уравновешены. При равновесии плеч моста существует между ними следующее соотношение

для емкости:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{\omega C_э} : \frac{1}{\omega C_x} \quad \text{или} \quad \frac{\omega C_x}{\omega C_э} = \frac{R_1}{R_2},$$

откуда

$$C_x = C_э \frac{R_1}{R_2}. \tag{39}$$

Для последовательного эквивалентного сопротивления будем иметь:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R}{R_x},$$

откуда

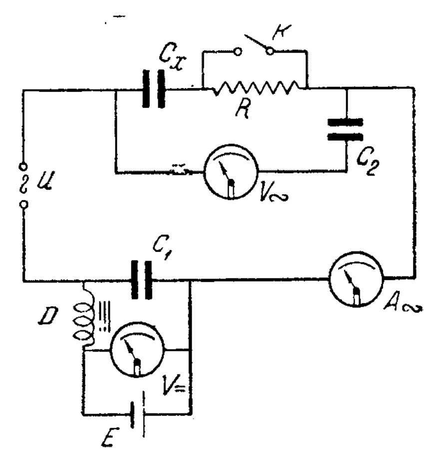
$$R_x = R \frac{R_2}{R_1}. \tag{40}$$

Измерив, таким образом, емкость и последовательное сопротивление конденсатора, можно вычислить тангенс угла потерь по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = C_x R_x \omega. \tag{23}$$

Измерение методом вольтметра-амперметра. Мостовой метод более точен, но этим методом трудно измерять большие емкости из-за невозможности подобрать большую эталонную емкость. Поэтому большие емкости измеряют главным образом методом вольтметра-амперметра.

Установка для измерения этим методом изображена на фиг. 69. Эта установка состоит из следующих деталей: U — источник переменного тока; E — источник постоянного тока, предназначенный для поляризации конденсатора; D — дроссель; $V_{=}$ — вольтметр постоянного тока; C_1 — конденсатор, предохраняющий источник постоянного тока от короткого замыкания; C_2 — конденсатор (обычно бумажный), не позволяющий постоянному току проходить через вольтметр переменного тока; C_x — измеряемый электролитический конденсатор, $V_{\sim}$ — вольтметр переменного тока, A — амперметр переменного тока; R — активное сопротивление; K — ключ, посредством которого замыкается накоротко сопротивление R.



Фиг. 69. Схема измерительной установки для измерения емкости методом вольтметра-амперметра.

Значение C_1 должно приближаться по величине к емкости измеряемого конденсатора и, во всяком случае, быть не ниже 200 μF (это может быть электролитический конденсатор). Сопротивление R изменяется в зависимости от величины измеряемой емкости и должно иметь значение, указанное в табл. 34, а также должно быть способно выдерживать проходящий через него ток. Чувствительность амперметра A также указана в табл. 34. Значение C_2 зависит от сопротивления вольтметра. При сопротивлении вольтметра 10 000 Ω величина емкости C_2 должна равняться 1—2 μF.

Измерение на этой установке производится следующим образом. Включают измеряемый конденсатор C_x и подают на него поляризующее напряжение. Ключ K в это время должен быть замкнут. Затем включают переменный ток, по вольтметру устанавливают определенное его напряжение и отсчитывают на амперметре A силу тока, проходящего по цепи. Напряжение переменного тока вообще не должно превышать 10 V; напряжение может быть меньше в зависимости от пикового напряжения измеряемого конденсатора.

Пусть отсчитанная на амперметре сила тока будет I_1.

После первого измерения отключают ключ K, устанавливают показания вольтметра на то же значение, какое было при предыдущем измерении, и опять отмечают показания амперметра. Пусть это будет I_2. Если бы измеряемый конденсатор не имел потерь, его емкость можно было бы вычислить, исходя из сопротивления конденсатора

переменному току:

$$\frac{U}{I_1}=\frac{1}{2\pi f C_x},$$

откуда

$$C_x=\frac{1\,000\,000\,I_1}{2\pi f U}\,\mu\mathrm{F}, \qquad (41)$$

где I_1 — в амперах, U — в вольтах и f — в герцах.

Когда не требуется измерить потери, часто этим результатом и ограничиваются. Для емкости ошибка обычно не превышает 3% и получается потому, что мы общее сопротивление переменному току последовательной (фиг. 67, b) схемы приняли за сопротивление схемы без потерь. Уже из фиг. 67 и 69 видно, что ошибка будет тем больше, чем больше потери конденсатора, выраженные последовательным сопротивлением R.

Для вычисления потерь конденсатора и более точного вычисления емкости пользуются результатами второго измерения с отключенным шунтом сопротивления.

Составим уравнение для последовательного сопротивления конденсатора R_x. При измерении с короткозамкнутым сопротивлением R мы измеряли сопротивление схемы, указанной на фиг. 67 b. Полное сопротивление этой схемы переменному току выражается формулой:

$$\frac{E}{I_1}=\sqrt{\frac{1}{\omega^2C_x^2}+R_x^2}\,. \qquad (42)$$

После того как ключ K разомкнут, к сопротивлению электролита R_x включилось последовательно еще сопротивление измерительной установки R. Общее сопротивление выразится в этом случае уравнением:

$$\frac{E}{I_2}=\sqrt{\frac{1}{\omega^2C_x^2}+(R+R_x)^2}. \qquad (42')$$

Составим из этих двух уравнений одно общее уравнение, сделав предварительно следующие преобразования:

$$\frac{1}{\omega^2C_x^2}+R_x^2=\left(\frac{E}{I_1}\right)^2; \quad \frac{1}{\omega^2C_x^2}+(R_x+R)^2=\left(\frac{E}{I_2}\right)^2;$$

$$\left(\frac{E}{I_1}\right)^2-R_x^2=\left(\frac{E}{I_2}\right)^2-R_x^2-2R_xR-R^2;$$

$$\left(\frac{E}{I_2}\right)^2-\left(\frac{E}{I_1}\right)^2-R^2=2R_xR.$$

Таким образом получим уравнение:

$$R_x=\frac{\left(\frac{E}{I_2}\right)^2-\left(\frac{E}{I_1}\right)^2-R^2}{2R}, \qquad (43)$$

по которому можно вычислить последовательное эквивалентное сопротивление потерь конденсатора.

Зная R_x, можно вычислить емкость из уравнения (42), из которого путем преобразований получается уравнение для вычисляемой емкости:

$$C_x = \frac{1\,000\,000}{2\pi f \sqrt{\left(\frac{E}{I_1}\right)^2 - R_x^2}}\ \mu F.$$

Затем по уже известной формуле можно вычислить тангенс угла потерь конденсатора:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C_x R_x.$$

Таблица 34

Значение измеряемой емкости в микрофарадах	R, Ω	Значения амперметра, A
100—340	10	0—1
340—1000	3	0—3
1000—3400	1	0—10
3400—10000	0,33	0—30

В табл. 34 указано, какой величины нужно брать сопротивление R и на какую силу тока должен быть рассчитан амперметр, чтобы достаточно точно измерить конденсатор.



Фиг. 70. Прибор фирмы Маркони для измерения характеристик электролитических конденсаторов.

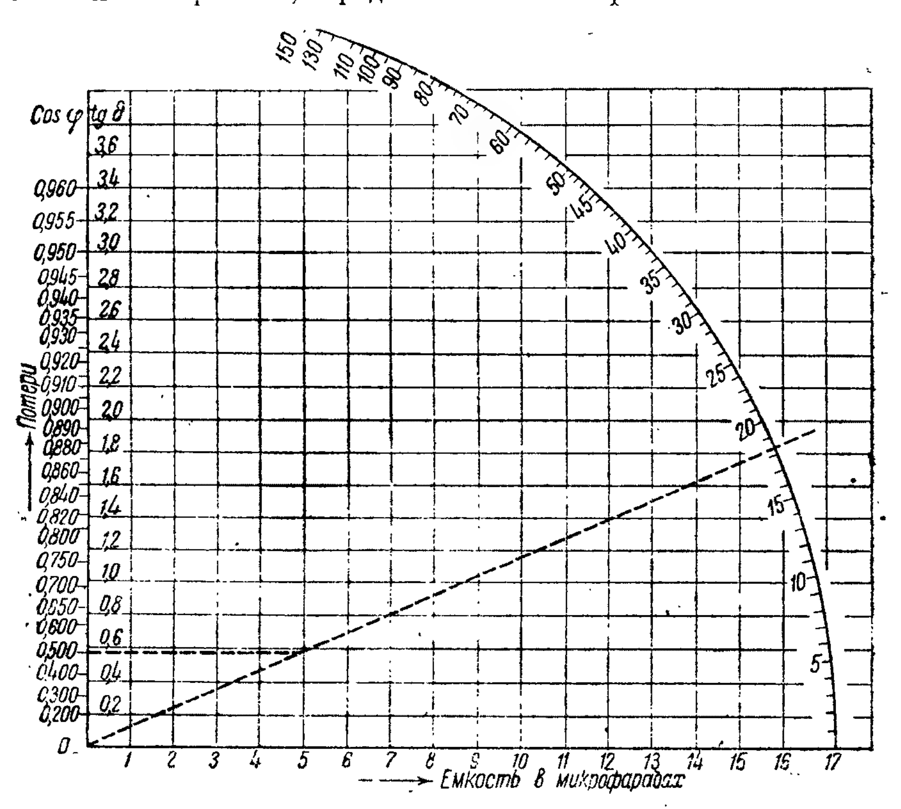
Некоторые фирмы изготовляют универсальные мосты для измерения электролитических конденсаторов.

На фиг. 70 показан такой мост фирмы Маркони. Этим прибором можно снять все параметры электролитических конденсаторов: ток утечки, емкость, коэфициент мощности и пробивное напряжение. На этом мосте можно измерять конденсаторы с напряжением от 6 до 600 V и емкостью от 1 до 2200 μF.

8. РАЗЛИЧНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ И НОМОГРАММА ПЕРЕСЧЕТА

Величину потерь электрической энергии в электролитических конденсаторах можно выразить различными способами. Чаще всего их выражают через $\operatorname{tg}\delta$, R или $\cos\varphi$.

Когда угол δ мал, тогда $\operatorname{tg} \delta$ и $\cos \varphi$ мало различаются по величине. Однако с увеличением угла δ, что будет при больших потерях, разница между ними будет возрастать. Часто для сравнительной оценки качества конденсаторов, потери которых выражены различными способами, или в связи с расчетом электрической цепи переводят одни величины в другие. Для такого перевода удобно пользоваться номограммой, представленной на фиг. 71.



Фиг. 71. Номограмма для вычисления потерь.

На оси абсцисс номограммы нанесены значения емкости в микрофарадах, а по оси ординат — значения тангенса угла потерь и коэфициента мощности. Значения последовательного сопротивления R нанесены на дуге. Пользуясь этой номограммой, легко для данной емкости по одному известному параметру определить два других.

Пользуются номограммой так. Пусть нам известны емкость и коэфициент мощности конденсатора и требуется определить R. Тогда из соответствующих точек восстанавливаем перпендикуляры до их пересечения; из начала координат проводим через эту точку пересечения прямую до пересечения с дугой. Точка пересечения дуги с прямой укажет нам значение R.

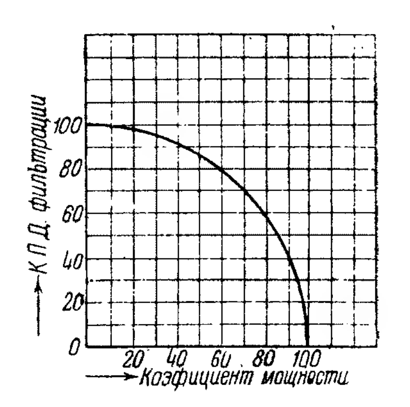
$\cos \varphi$ и $\operatorname{tg} \delta$ можно сравнивать непосредственно на оси ординат без какого-либо построения.

Номограмма построена для частоты 1000 Hz. Если требуется по этой номограмме получить результат для других частот, тогда полученные из номограммы значения перемножают на переводные коэфициенты: для R на $\frac{1000}{f}$, а для $\operatorname{tg} \delta$ на $\frac{f}{1000}$, где f — частота, при которой желательно получить искомые характеристики.

Нужно заметить, что номограмма вычислена из предположения, что $\operatorname{tg} \delta$ растет линейно с ростом частоты. Но, как уже было указано, для электролитических конденсаторов существует несколько иная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты. Поэтому при переходе к другой частоте получится некоторая ошибка. Действительные потери будут несколько ниже, чем полученные из номограммы. Эта ошибка будет тем больше, чем больше потери конденсатора и чем меньше частота, для которой желаем воспользоваться этой номограммой.

9. ВЛИЯНИЕ КОЭФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НА КОЭФИЦИЕНТ ФИЛЬТРАЦИИ

В радиоустройствах электролитические конденсаторы наибольшее применение нашли в фильтрах блоков питания приемников. Выше уже говорилось, что благодаря очень тонкому диэлектрику в сравнительно малом объеме можно получить большие емкости, что в свою очередь значительно удешевляет аппаратуру. Тем не менее, имея в виду большой коэфициент мощности электролитических конденсаторов по сравнению, например, с бумажным, часто считают, что применение электролитических конденсаторов отрицательно скажется на работе приемника, потому что их большие коэфициенты мощности уменьшат коэфициент полезного действия фильтрации.



Фиг. 72. Зависимость коэфициента фильтрации от коэфициента мощности.

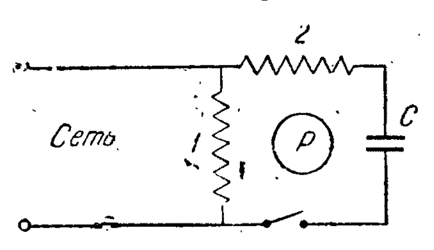
На фиг. 72 показана зависимость коэфициента полезного действия фильтра, от коэфициента мощности конденсатора, входящего в фильтр. Чем выше коэфициент мощности, тем меньше фильтрующая способность конденсатора. Однако, как показывает расчет, конденсатор, даже с коэфициентом мощности 20%, уменьшает коэфициент фильтрации только на 2%. Хорошие же электролитические конденсаторы имеют коэфициент мощности от 5 до 10%, что вполне гарантирует их хорошую работу в качестве фильтрующих конденсаторов.

10. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Как правило, электролитические конденсаторы благодаря вентильному эффекту оксидной пленки полярны и поэтому приме-

няются только в цепях постоянного или пульсирующего прямого тока. Однако за последнее время получают распространение неполярные электролитические конденсаторы, могущие работать в цепях переменного тока. Как будет выяснено ниже, при больших напряжениях эти конденсаторы долго работать не могут. Поэтому наибольшее применение они получили в качестве пусковых для пуска однофазных двигателей переменного тока, где они включаются на сравнительно короткое время.

Схема включения конденсатора в двигателе приведена на фиг. 73. Без наличия конденсатора этот мотор можно запустить только от руки. Если же во вспомогательную цепь включен электролитический конденсатор, то благодаря его большой емкости создается вспомогательная фаза, благодаря которой двигатель получает большой вращающий момент и поэтому пускается в ход самостоятельно. После пуска вспомогательная фаза не нужна и конденсатор отключается. Таким образом конденсатор используется здесь только в течение короткого промежутка времени, в момент запуска мотора, т. е. всего в течение 1—2 сек.



Фиг. 73. Схема включения двигателя с конденсатором.

По своему устройству электролитические конденсаторы для переменного тока отличаются от полярных электролитических конденсаторов только тем, что у них обе алюминиевые пластины оксидированы. Схематически такой конденсатор представлен на фиг. 74.

Рассмотрим, как будет вести себя этот конденсатор в цепи переменного тока. Пусть к конденсатору приложено переменное напряжение U. Его можно представить графически синусоидой (рис. *а* на фиг. 74). Напряжение это сначала возрастает от нуля до положительного значения U_1, затем опять переходит через нуль и возрастает до отрицательного значения U_2. Таким образом в каждую последующую половину периода к алюминиевым оксидированным пластинам приключен то положительный, то отрицательный полюс.

Обозначим оксидированные пластины цифрами *1* и *2*. Пусть в первую половину периода к пластине *1* приключен положительный полюс. Тогда на этой пластинке, так как она в это время ток не пропускает, будут накопляться положительные заряды. Пластина же *2*, будучи отрицательным полюсом, не будет задерживать ток; он пройдет через эту пластину и отрицательные заряды будут накапливаться в электролите.

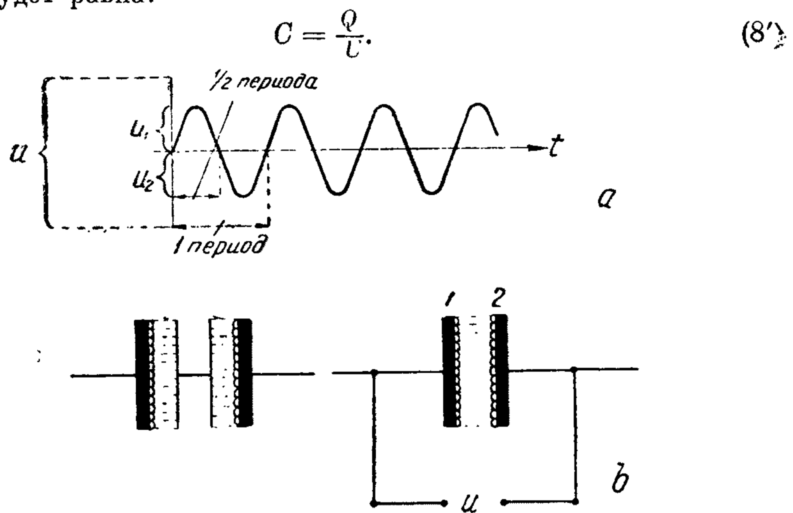
Во вторую половину периода положительно зарядится вторая пластина, а первая будет пропускать ток, и электролит опять-таки зарядится отрицательно. Таким образом электролит будет все время заряжен отрицательным зарядом, который переходит каждую половину периода от одной пластины к другой, а пластины поочередно будут заряжаться положительными зарядами.

Работу такого конденсатора, таким образом, можно представить, как работу двух полярных электролитических конденсаторов, включенных последовательно навстречу друг другу, т. е., иначе говоря, с соединенными между собой катодами (фиг. 74 *b*, слева).

Какова же будет емкость такого конденсатора?

Как известно, емкость конденсатора определяется как отношение заряда конденсатора к напряжению между его обкладками. В данном случае, если к рассматриваемому конденсатору приложено напряжение U, а заряжен он количеством электричества Q, то его емкость будет равна:

$$C = \frac{Q}{U}. \qquad (8')$$



Фиг. 74. Схема электролитического конденсатора для переменного тока:

В первый полупериод конденсатор зарядится зарядом:

$$Q_1 = C_1 U_1. \qquad (8'')$$

Во второй полупериод он зарядится зарядом:

$$Q_2 = C_2 U_2. \qquad (8''')$$

В уравнениях (8″) и (8‴) C_1 означает емкость первой, а C_2 емкость второй пластин конденсатора, измеренных отдельно.

Выше было установлено, что отрицательный заряд конденсатора находится в электролите, переходя поочередно то к одной, то к другой пластине. Этот заряд по своей величине колеблется между величинами Q_1 и Q_2. Среднее его значение, определяющее заряд конденсатора в целом, будет равно среднему арифметическому зарядов каждой пластинки в отдельности:

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}.$$

Подставив значения Q_1 и Q_2 из формул (8″) и (8‴), получим:

$$Q = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{2}. \qquad (8'''')$$

Полная емкость конденсатора определится из формулы (8'), если подставить вместо Q его значение из формулы (8''''):

$$C=\frac{Q}{U}=\frac{C_1U_1+C_2U_2}{2U}.$$

По фиг. 74 заключаем, что значения U_1 и U_2 различны только по знаку, но имеют одинаковые абсолютные величины и в сумме составляют напряжение U, приложенное к конденсатору; иначе говоря,

$$U_1=U_2=\frac{U}{2}.$$

Приняв это во внимание, можно формулу (8'''') емкости конденсатора преобразовать следующим образом:

$$C=\frac{C_1\frac{U}{2}+C_2\frac{U}{2}}{2U}={}^1/_4\,(C_1+C_2). \qquad (45)$$

Таким образом емкость электролитического конденсатора для переменного тока равна одной четверти суммы емкостей обеих оксидированных пластин. Так как неполярный электролитический конденсатор эквивалентен двум последовательно, навстречу друг другу включенным, полярным электролитическим конденсаторам, то емкость двух, таким образом, последовательно включенных полярных электролитических конденсаторов равна одной четверти суммы емкостей этих конденсаторов.

Если последовательно включены два полярных конденсатора с одинаковой емкостью, то общая их емкость равна половине емкости одного конденсатора.

Если вспомним, что емкость последовательно включенных бумажных конденсаторов равна: $C=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}$, то увидим,что и по величине емкости и по характеру работы эти системы друг от друга отличаются. Это различие обусловливается вентильным свойством оксидной пленки. В данном случае каждый электрод подвергается действию слагающей переменного напряжения, равной половине напряжения, и действует как самостоятельный конденсатор, испытывающий пульсирующее, но одного направления напряжение.

Из этого следует, что электролитический конденсатор для переменного тока легко получить из двух полярных конденсаторов. Для этого только нужно соединить их катодные выводы, а анодные выводы оставить для включения в цепь переменного тока.

Потери в неполярном электролитическом конденсаторе по величине такие же, как и в полярном. Иначе и не может быть, так как потери в электролитическом конденсаторе обусловливаются сопротивлением электролита, а сопротивление электролита не изменится от того, что катодная неоксидированная пластинка заменяется оксидированной, если все остальное остается тем же.

В неполярном электролитическом конденсаторе можно также измерять ток утечки, который будет характеризовать степень за-

формовки диэлектрика конденсатора. Только измерение тока утечки следует производить в обоих направлениях. Включив конденсатор в одном каком-либо направлении под напряжение постоянного тока и измерив ток утечки, необходимо затем переменить полюса и вторично измерить ток утечки. Только в таком случае мы можем иметь правильное представление о токе утечки неполярного электролитического конденсатора.

Выше было указано, что во время бездействия пленка электролитических конденсаторов расформовывается и что степень расформовки можно характеризовать характером спадания тока утечки со временем. Наоборот, при работе, если нет других причин (коррозия), пленка полярного конденсатора еще больше укрепляется. У неполярных электролитических конденсаторов дело обстоит несколько иначе. При работе в цепи переменного тока пленка каждую половину периода подвергается то действию формовки, то действию расформовки более интенсивной, чем в период бездействия. Поэтому естественно, что в процессе работы характеристика тока утечки неполярного электролитического конденсатора будет постепенно ухудшаться. Сопоставления степени расформовки по току утечки у бездействовавших в течение одного месяца полярных конденсаторов и непрерывно работавших также в течение месяца неполярных показывают, что расформовка неполярных конденсаторов при их работе протекает примерно в 3—4 раза быстрее, чем у полярных в период бездействия. Поэтому при длительной работе неполярные конденсаторы надо периодически подформовывать. Подформовка производится постоянным током сначала в одном направлении, а затем в другом.

Емкость и потери этих конденсаторов, конечно, можно измерять методами, описанными выше. Однако в постоянном поляризующем напряжении, столь необходимом при измерении полярных конденсаторов, здесь нет надобности. Быстро определить емкость неполярного конденсатора можно непосредственным включением его последовательно с амперметром в городскую сеть переменного тока. Тогда, отметив по амперметру силу тока, можно подсчитать емкость по формуле:

$$C = 3185 \frac{I}{U} \text{ микрофарад}, \tag{46}$$

где I — сила тока, а U — напряжение в вольтах.

При необходимости измерить и потери в конденсаторе, в измерительную цепь включают еще ваттметр и потери определяют в ваттах. Коэфициент мощности $\cos \varphi$ найдем, разделив показания ваттметра на произведение напряжения на силу тока:

$$\cos \varphi = \frac{P}{IU}, \tag{47}$$

где P — мощность конденсатора (потери) в ваттах.

Разумеется, подключать к сети можно только такие конденсаторы, у которых пленка заформована до напряжения большего, чем напряжение в сети.

11. ИСПЫТАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Кроме обычных испытаний конденсаторов на ток утечки, емкость и потери, их подвергают еще и другим испытаниям с целью проследить изменение этих характеристик в зависимости от длительности и условий работы конденсаторов.

К таким испытаниям относятся:

1. Проверка изменения свойств конденсаторов от длительности их работы, что в практике получило название испытания на старение или на срок службы конденсаторов.

2. Испытание на перегрузку.

3. Проверка влияния на качество конденсаторов высоких и низких температур.

4. Испытание на влагостойкость.

У долго работающих конденсаторов обычно наблюдается некоторое снижение емкости и увеличение потерь. Ток утечки же с длительной работой иногда немного уменьшается, но чаще возрастает. При рассмотрении вскрытых, долго работавших сухих электролитических конденсаторов часто обнаруживается, что анодная оксидированная фольга имеет сквозные дырочки, хотя общий вид поверхности фольги нормальный. Почти всегда наблюдается, что торцы фольги и особенно выводы разъедены, а паста электролита почти превратилась в сухой порошок. У жидкостных конденсаторов наблюдается осадок гидроокиси алюминия.

При выяснении изменений свойств электролитических конденсаторов при длительной их работе необходимо всегда иметь в виду, что конденсаторы представляют собой электролитическую ячейку, на аноде которой нанесен пористый слой диэлектрика, допускающий некоторое прохождение электролизного тока (тока утечки) во время работы конденсатора. Процессы же электролиза, как известно, сопровождаются химическими изменениями самого материала электродов и электролита.

При нормальных условиях и при постоянной работе мокрый электролитический конденсатор потеряет, приблизительно, 0,5 *г* электролита на 1 mA тока утечки за 1000 час. работы. Эта потеря электролита происходит вследствие разложения воды в процессе электролиза. В сухих электролитических конденсаторах эти потери приводят к высыханию пасты электролита, превращая ее постепенно в сухой порошок. Понятно, что при повышенных температурах потеря электролита будет происходить значительно интенсивнее, так как в этом случае, с одной стороны, повышается ток утечки, а с другой стороны, происходит более интенсивное испарение воды.

Оксидная пленка, являясь продуктом электролиза, также не может оставаться неизменной. Во время работы конденсатора она подвергается, с одной стороны, растворяющему действию электролита, а с другой стороны — формующему действию тока. Хотя и очень медленно, но под влиянием этих процессов материал анодной пластинки конденсатора постепенно будет расходоваться. Этим можно объяснить тот факт, что у жидкостных конденсаторов в электролите постепенно накапливается гидроокись алюминия. В жидкост-

ном конденсаторе, благодаря тому, что пленка во всех точках соприкасается с электролитом одинакового состава, процесс изнашивания анода происходит более или менее одинаково по всей поверхности. У сухих электролитических конденсаторов электролит вследствие пастообразной консистенции и, следовательно, отсутствию возможности быстрого выравнивания концентраций, имеет в различных точках соприкосновения с пленкой несколько отличный состав. Поэтому можно ожидать, что процесс электролиза в некоторых точках будет происходить интенсивней, чем в соседних, благодаря чему в этих точках могут появиться сквозные дырочки. У торцов секции электролит может впитывать из окружающей атмосферы влагу, содержащую различные примеси. Эти примеси могут вредно действовать на оксидную пленку. Поэтому главным образом на торцах и происходит разъедание анода конденсатора.

В результате этих электролитических процессов конденсатор изнашивается (стареет) и его электрические характеристики меняются. У сухих конденсаторов вследствие высыхания электролита увеличится сопротивление, а следовательно увеличатся потери и уменьшится емкость. Когда электролит достаточно сух, между ним и пленкой могут накопляться пузырьки газа, которые, увеличивая в этих точках расстояние до обкладок конденсатора, также уменьшат емкость. У жидкостного конденсатора накапливающаяся суспензия гидроокиси алюминия увеличит сопротивление электролита, а следовательно увеличит потери и уменьшит емкость.

Если в электролите отсутствуют вредные примеси и анодный алюминий по химическому составу достаточно чист, то ток утечки с длительной работой должен уменьшаться. Повышение тока утечки со временем указывает, что в конденсаторе под влиянием вредных примесей происходит коррозия пленки.

Вообще присутствие вредных примесей как в анодной алюминиевой фольге, так и в электролите сильно ускоряет порчу конденсатора и уменьшает срок его службы. В этом случае порча конденсатора происходит главным образом вследствие разрушения анода.

Ухудшение характеристик конденсатора наступает не сразу, а через некоторое, довольно значительное время. В первое же время работы конденсатора его характеристики даже улучшаются — уменьшается ток утечки и несколько увеличивается емкость. Это можно объяснить тем, что, как уже указывалось, пленка с течением времени улучшает свои диэлектрические свойства, что приводит к уменьшению тока утечки. С другой стороны, так как при работе конденсатора пленка находится под формующим рабочим напряжением, более низким, чем формовочное напряжение, при котором она изготовлялась, пленка постепенно приспосабливается к этому меньшему подформовывающему напряжению и толщина ее под влиянием растворения несколько уменьшается, отчего емкость конденсатора несколько увеличивается.

Увеличение потерь и снижение емкости конденсатора могут явиться результатами влияния процессов, происходящих на катоде. Когда конденсатор нагружен напряжением постоянного тока, то

у катода будут скопляться щелочные катионы, которые постепенно будут его растворять, в результате чего в электролите будет накопляться суспензия гидроокиси алюминия. На катоде может также постепенно образоваться оксидная пленка, которая, с одной стороны, включена как омическое последовательное сопротивление, а с другой стороны, действует как последовательно включенный конденсатор. И то и другое вызовет уменьшение емкости и увеличение потерь конденсатора.

Таблица 35

Измеряемая система	Емкость, μF	Коэфициент мощности, %
Конденсатор № 5	13,6	28
Корпус конденсатора № 5 с платиновым электродом	80	—
Анод конденсатора № 5 с корпусом № 1	16	22,5
Корпус № 1 с платиновым электродом	100	—
Конденсатор № 2	12,5	32,5
Корпус конденсатора № 2 с платиновым электродом	25	—
Анод конденсатора № 2 с корпусом № 3	15	15,5
Корпус № 3 с платиновым электродом	1000	—

В табл. 35 приведены данные измерений емкости и потерь жидкостных конденсаторов № 2 и 5, емкости катодов (корпуса) этих конденсаторов с платиновыми катодами, емкости и потерь анодов этих конденсаторов в системе с катодами (корпусами) № 1 и 3, а также емкость катодов № 1 и 3 в системе с платиновыми электродами. Из рассмотрения таблицы следует, что катоды (корпусы) конденсаторов № 5 и 2 были покрыты достаточно толстой оксидной пленкой, которая показала емкость 25 и 80 μF. Корпуса № 1 и 3 были покрыты, как видно из измерения емкости, более тонкой пленкой. Поэтому одни и те же аноды, помещенные в корпуса № 2 и 5, показали заниженную емкость и большие потери, а будучи помещены в корпуса № 1 и 3, они показали большую емкость и меньшие потери. Электролит во всех случаях был один и тот же.

Испытание на длительность службы. При испытаниях на срок службы стараются создать такие условия, при которых конденсаторы обычно работают. Для большинства типов электролитических конденсаторов наиболее удовлетворительными условиями испытания являются такие, при которых их ставят на длительное время под свое рабочее напряжение при комнатной температуре. При этом около 6% наложенного напряжения должна составлять переменная слагающая. Так, например, к конденсатору с рабочим напряжением 450 V при испытании на срок службы необходимо прикладывать 423 V постоянного и 27 V переменного напряжения. При комнатной температуре (18—25°) такие испытания могут длиться от 5000 до 15 000 час. непрерывно. Хорошие конденсаторы за это время не должны заметно изменять своих электрических характеристик.

Такие испытания продолжающиеся от 7 до 21 мес., обнаруживают недостатки данной партии конденсаторов только через длительное время и не дают возможности своевременно принять меры к улучшению их производства. Поэтому чаще применяются методы ускоренных испытаний при повышенных температурах. В зависимости от типов конденсаторов и их рабочих условий температура испытания устанавливается от 45 до 85°. Длительность испытаний может сократиться до 500—1000 час.

Например американская фирма RCA при испытании сухих электролитических конденсаторов требует, чтобы они при температуре 60° простояли под испытательным напряжением 1000 час. При этом характеристики их должны измениться не больше, чем указано в табл. 36.

Таблица 36

Характеристики конденсаторов	Изменение в % для конденсаторов	
	сухих	жидкостных
Ток утечки	+ 0	+10
Эквивалентное последовательное сопротивление	+50	+50
Емкость	—10	—30, +10

Влияние длительности бездействия на свойства конденсатора было описано выше в разделе о токе утечки.

Испытания на перегрузку. Испытание на перегрузку имеет целью выяснить, как быстро изнашиваются конденсаторы, если при работе они будут испытывать перегрузки. Так как обычно конденсатор может подвергаться при работе перегрузке на короткое время, то и испытания проводят в виде циклов, за время которых конденсатор то подвергается перегрузке, то опять нагружается нормальным рабочим напряжением. Напряжение перегрузки для каждого типа конденсаторов должно оговариваться в технических условиях и зависит от условий, в которых этот тип конденсатора будет работать. В общем величина перегрузки превышает пиковое напряжение конденсатора на 30—70% для сухих и на 10—50% для жидкостных конденсаторов.

В качестве примера приведем условия таких испытаний американской фирмы RCA. Испытание сухих конденсаторов производится при температуре 60—65°. На конденсатор подается его перегрузочное напряжение, при котором он выдерживается 10 сек. По истечении этого времени напряжение снижается до рабочего. при котором его выдерживают 230 сек. Затем цикл повторяется. Хорошие конденсаторы должны выдержать 3000 таких циклов и при этом не должны пробиться или потерять емкость больше, чем на 10%.

При испытании на перегрузку жидкостных электролитических конденсаторов необходимо иметь в виду, какой тип испытывается регулирующий или нерегулирующий. Выше уже было сказано, что регулирующие конденсаторы при напряжении перегрузки (регулирующем напряжении) должны пропускать определенный ток

и не давать в то же время искрения. Этим собственно они и отличаются при испытании на перегрузку от обычных нерегулирующих жидкостных конденсаторов. У последних при напряжении перегрузки не учитывается ток утечки и допускается искрение.

На заводе «Электросигнал» приняты для испытания на перегрузку жидкостных регулирующих электролитических конденсаторов следующие условия. Конденсатор включают на 20 сек. под перегрузочное напряжение; затем напряжение снижается до рабочего, под которым конденсатор выдерживают 40 сек. После этого конденсатор на 180 сек. отключают, т. е. дают ему передышку, а затем цикл повторяют снова. При температуре окружающего воздуха около 21° (комнатная) конденсатор должен выдержать 5000 таких циклов и при этом его емкость, ток утечки и последовательное эквивалентное сопротивление не должны заметно отличаться от заданных техническими условиями.

Испытание на устойчивость при разных температурах. Испытание конденсаторов на устойчивость при разных температурах производится, во-первых, с целью выяснить влияние окружающей температуры на изменение их электрических характеристик, и, во-вторых, с целью выяснить, как влияют крайние температуры, главным образом низкие, на конденсаторы за время их бездействия. Первое испытание должно определить, в каком температурном диапазоне может удовлетворительно работать данный тип конденсатора. С этой целью измеряют характеристики конденсаторов при различных температурах и строят графики зависимости этих характеристик от температуры.

Зная заранее, при каких температурах будет работать электрическая схема, в которой применяют электролитические конденсаторы, и имея соответствующие графики, можно без ошибки выбрать соответствующий тип конденсатора. При проведении этих испытаний рекомендуется начинать измерение не с высоких, а с низких температур. Это рекомендуется потому, что трудно заранее знать, какие предельно высокие температуры могут выдержать испытуемые конденсаторы. При высоких температурах может расплавиться заливочная масса, может стечь электролит и возникнуть другие, чисто механические повреждения конденсатора. При низких температурах этого не наблюдается.

Выше уже было подробно описано влияние температуры на электрические характеристики конденсаторов и приведены соответствующие графики.

Второе испытание производится иначе. Без подведения напряжения конденсаторы подвергают действию низких температур, затем доводят до обычной комнатной температуры, при которой и замеряют их характеристики. По техническим условиям американских фирм замораживание производится до —30°. При этом требуется, чтобы не произошло никаких необратимых физических повреждений конденсаторов. Такое испытание производится с целью выяснить влияние главным образом низких температур, в которых могут находиться конденсаторы при их перевозке.

Испытание на влагостойкость. Испытание на влагостойкость производится только с конденсаторами, рабочий электролит которых составлен не на воде, а с какими-либо другими не водными растворителями — глицерином, этиленгликолем и т. п. Эти растворители, как известно, будучи оставлены открытыми, впитывают в себя влагу из окружающей атмосферы.

По данным фирмы RCA испытание сводится к следующему. Конденсаторы помещают в камеру с относительной влажностью 90% и выдерживают там при температуре 38° без напряжения в течение 100 час. После этого производятся измерения. Требуется, чтобы конденсаторы изменили ток утечки не больше, чем на + 25%, а остальные характеристики остались неизменными.

Испытания на влагостойкость имеют целью выяснить совершенство влагоизоляции корпуса и заливочной массы. Проникновение влаги внутрь конденсатора, вообще говоря, очень нежелательно. Попав в электролит, влага изменяет его концентрацию, благодаря чему уже изменяются характеристики, так как они очень сильно зависят от свойств электролита. Кроме того, проникающая в электролит влага, как правило, содержит растворенные примеси, например хлористые соли, вредно действующие на оксидную пленку. В результате проникновения влаги алюминиевая фольга и оксидная пленка подвергаются коррозии; поэтому увлажнение и сказывается в первую очередь на возрастании тока утечки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

